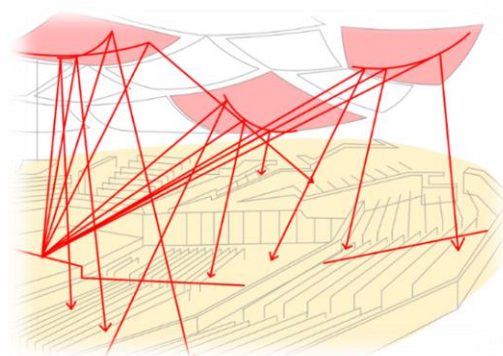




**FACULDADE DE ARQUITETURA**  
UNIVERSIDADE DE LISBOA

## **A Arquitetura como Instrumento Acústico**

Os campos sonoros musicais como base da composição arquitetónica dos espaços destinados à audição musical



**Maria do Rosário Correia Simões**

*(Licenciada)*

Dissertação de Natureza Científica para a obtenção do Grau de Mestre em Arquitetura

**Orientação Científica:**

Professor Doutor Jorge Tavares Ribeiro

Professor Doutor Pedro Martins da Silva

**Júri:**

**Presidente:** Doutor António Leite

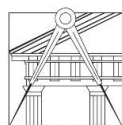
**Vogal:** Doutor Jorge Tavares Ribeiro

**Vogal:** Doutora Sónia Antunes

**DOCUMENTO DEFINITIVO**

*Lisboa, FA Ulisboa, Janeiro, 2021*

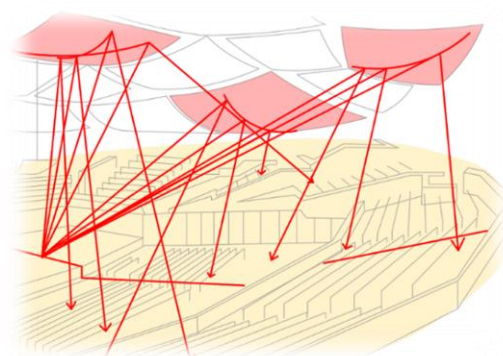




**FACULDADE DE ARQUITETURA**  
UNIVERSIDADE DE LISBOA

## **A Arquitetura como Instrumento Acústico**

Os campos sonoros musicais como base da composição arquitetónica dos espaços destinados à audição musical



**Maria do Rosário Correia Simões**

*(Licenciada)*

Dissertação de Natureza Científica para a obtenção do Grau de Mestre em Arquitetura

**Orientação Científica:**

Professor Doutor Jorge Tavares Ribeiro

Professor Doutor Pedro Martins da Silva

**Júri:**

**Presidente:** Doutor António Leite

**Vogal:** Doutor Jorge Tavares Ribeiro

**Vogal:** Doutora Sónia Antunes

**DOCUMENTO DEFINITIVO**

*Lisboa, FA Ulisboa, Janeiro, 2021*



*Estar na sala é como viver no violino.*

*A sala em si é um instrumento*

Louis I. Kahn (citado por Rooth, 2017, p. 103)

*Dorme uma canção em todas as coisas*

*Mergulhadas para sempre nos seus sonhos*

*E o mundo acorda para cantar*

*Se encontrares a palavra mágica*

Eisendorff, wunschelrute, 1835 (citado por Michels, 2007, p. 437)



*Ao meu Maestro, à minha Mãe, à  
minha Avó e ao meu Avô*



## RESUMO

*“A arquitetura afeta todos os nossos sentidos... A percepção da arquitetura, portanto, é uma atividade na qual todo o corpo é envolvido...”* (Rooth, 2017, p. 103). *“Estar na sala é como viver no violino. A sala em si é um instrumento”* (Kahn, 1965, p. 318, citado por Roth, 2017, p. 103).

Estas duas premissas suportam o propósito desta dissertação, a qual, resumidamente, consiste em perspetivar a arquitetura na ótica da integração da sua componente acústica, permitindo que o desenho de espaços para a música, nomeadamente de grandes salas de concerto, tenha por base a noção da configuração do campo sonoro e, por trás desta, a sensibilidade referente ao carácter musical que é o contexto do mesmo. Não só o fundamento acústico deve ser tido em conta, mas também outros aspetos relativos à aparência visual e organização funcional ergonómica e ambiental, os quais, como em qualquer edifício, têm de ser manejados de modo a promover o conforto aos habitantes. Não obstante, este trabalho focar-se-á, embora em balanço com algumas exigências básicas de outras ordens, como a dimensão do público, etc, na acústica da sala, pois é a base do carácter funcional relativo ao propósito da mesma.

Como tal, a dissertação expõe algumas reflexões sobre a essência da acústica, alguns fundamentos sobre a física do som, ao que se segue o tratamento dos parâmetros acústicos que descrevem diversas sensações associadas à experiência musical, os quais serão posteriormente abordados em função da arquitetura, e, por fim, ilustra-se esta integração por meio de casos de referência num contexto histórico- musical.

Como poderá ser aferido, a geometria, a materialidade, etc... influenciam grandemente a acústica. Hoje em dia pode recorrer-se a parâmetros caracterizadores da experiência musical, que permitem estudar a viabilidade acústica dos projetos, conduzindo, assim, a uma optimização geométrica e material da sala.

## PALAVRAS-CHAVE

Arquitetura   Acústica   Experiência Musical   Campos Sonoros   Geometria   Materialidade



## **ABSTRACT**

*"A arquitetura afeta todos os nossos sentidos... A percepção da arquitetura, portanto, é uma atividade na qual todo o corpo é envolvido..." (Rooth, 2017, p. 103). "Estar na sala é como viver no violino. A sala em si é um instrumento" (Kahn, 1965, p. 318, quoted by Roth, 2017, p. 103).*

These two statements support the purpose of this thesis, which, in short, consists of looking at architecture from the perspective of integrating its acoustic component, allowing the space design for music, namely large concert halls, based on the sound field configuration concept and, behind it, the sensitivity regarding the musical character that is the context of it. Not only the acoustics must be considered, as well as other aspects related to the visual appearance and ergonomic and environmental functional organization, as in any building, must be managed to promote the inhabitant's comfort. Nevertheless, this work will focus, in balance with some basic requirements, such as the audience size, etc., on the room acoustics, as it is the basis of the functional character related to its purpose.

As such, the thesis exposes some reflections on the acoustics, some fundamentals on the physics of sound, followed by the acoustic parameters treatment that describe several sensations linked with the musical experience, which later will be approached on the architecture domain, and, finally, this integration is illustrated by reference cases in a historical-musical context.

As can be verified, the geometry, the materiality, etc. influence the acoustics significantly. Nowadays, the parameters that characterize the musical experience can be used, which allow the acoustic feasibility study of the architecture design, thus leading to a geometric and material optimization of the concert halls.

## **KEYWORDS**

Architecture    Acoustic    Musical Experience    Sound Fields    Geometry    Materiality



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, do Qual existo e me construo.

Agradeço aos meus orientadores, Jorge Tavares Ribeiro e Pedro Martins da Silva, pela paciência e disponibilidade com que sempre me ouviram e ajudaram.

Agradeço aos meus pais e à minha avó pela força e o modo como sempre me encorajaram.

Agradeço ao meu padrinho, à minha irmã e ao meu tio pelo apoio.

Agradeço aos meus afilhados Santiago e Mateus pela tranquilidade em certos momentos mais difíceis.

Agradeço à minha família e aos meus amigos que direta ou indiretamente me apoiaram.



# Índice

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Tema (enquadramento e justificação) .....	1
1.2. Delimitação Temporal .....	2
1.3. Objetivo .....	2
1.4. Metodologia .....	3
1.5. Estrutura da dissertação .....	4
2. BREVE EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO ESTADO DO CONHECIMENTO .....	7
3. A ESSÊNCIA DA ACÚSTICA E OS MODELOS DE ADAPTAÇÃO À REALIDADE .....	11
4. A FÍSICA DO SOM.....	15
4.1. Teoria Ondulatória .....	15
4.1.1. Movimento Oscilatório Simples: Sinusoide.....	16
4.1.2. Movimento Oscilatório complexo.....	17
4.2. Sistemas de medição.....	19
4.2.1. Bandas de Frequência .....	19
4.2.2. Magnitudes sonoras.....	20
4.2.3. Nível de Pressão Sonora: SPL .....	21
4.2.4. Curvas de ponderação.....	22
4.2.5. Indicadores de ruído .....	23
4.2.6. Medição de ruído e tipos de ruído .....	24
4.2.7. Ruído de fundo em recintos- Curvas NC .....	26
4.3. Fonte sonora .....	27
4.3.1. Tipos de fonte ideal.....	27
4.3.2. Diretividade da fonte sonora .....	28
4.4. Comportamento do campo sonoro.....	28
4.4.1. O som no espaço .....	28
4.4.2. Modelos de caracterização acústica .....	37

5. PARÂMETROS SUBJETIVOS E OBJETIVOS DA EXPERIÊNCIA MUSICAL.....	41
5.1. Os ensaios.....	41
5.1.1. Linearidade e não linearidade dos parâmetros .....	43
5.1.2. Ortogonalidade .....	44
5.1.3. Quais os parâmetros mais relevantes? .....	45
5.2. Modelação dos atributos .....	46
5.2.1. Som direto, primeiras reflexões e som reverberante .....	46
5.2.2. Grupos de parâmetros .....	47
6. A “ORGANOLOGIA” DAS SALAS DE CONCERTO: INTEGRAÇÃO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS NO DESENHO ARQUITETÓNICO .....	67
6.1. Características subjetivas Gerais do ambiente acústico .....	68
6.2. Volume e Lotação.....	69
6.3. Geometria da sala e o campo sonoro .....	71
6.3.1. O controlo do campo sonoro .....	71
6.3.2. Desenho das primeiras reflexões .....	72
6.3.3. Forma .....	76
6.3.4. Tetos.....	93
6.3.5. Pavimentos.....	97
6.4. Varandas e Camarotes .....	100
6.4.1. Varandas.....	100
6.4.2. Camarotes .....	103
6.5. Sistemas do revestimento.....	104
6.5.1. Absorção.....	105
6.5.2. Difusão.....	111
6.6. Assentos .....	116
6.7. Palcos.....	117
6.7.1. Disposição da orquestra.....	118

6.7.2. Dimensões e disposição .....	118
6.7.3. A envolvente .....	120
6.7.4. Materialidade .....	124
7. CONTEXTO HISTÓRICO- MUSICAL DO DESENVOLVIMENTO DAS SALAS DE CONCERTO .....	127
7.1. Os espaços para a música antes do Período Barroco .....	128
7.1.1. O caráter musical antes do Barroco .....	130
7.2. Período Barroco .....	131
7.2.1. Os espaços para a música do Período Barroco .....	131
7.2.2. O caráter musical do Período Barroco .....	133
7.3. Período Clássico .....	135
7.3.1. Os espaços para a música do Período Clássico .....	135
7.3.2. O caráter musical do Período Clássico .....	138
7.3.3. Casos de referência .....	139
7.4. Período Romântico.....	145
7.4.1. Os espaços para a música do Período Romântico .....	145
7.4.2. O caráter musical do Período Romântico .....	145
7.4.3. Casos de Referência .....	146
7.5. Período Moderno .....	156
7.5.1. Os espaços para a música do Período Moderno.....	156
7.5.2. O caráter musical do Período Moderno.....	157
7.5.3. Casos de Referência .....	158
8.CONCLUSÕES.....	163
ANEXO A.....	165
ANEXO B.....	167
ANEXO C.....	169
Bibliografia .....	171



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1 – Esquemática da metodologia .....	3
Fig. 2.1 – Comparação de plantas de vários teatros do séc. XVIII (Barron, 2009) .....	8
Fig. 3.1 – Da esquerda para a direita e de cima para baixo: martelos na ferraria de Jubal; Pitágoras quantifica o peso dos sinos e dos copos cheios de água; Pitágoras experimenta pesos no final de cordas de comprimento fixo e Pitágoras experimenta, com Filolau o comprimento de flautas para determinar as proporções exatas de sons consonantes (Beale, 2002) .....	12
Fig. 4.1 – Propagação das ondas sonoras (Assistance Escolaire, 2000-2020) .....	16
Fig. 4.2 – A amplitude do movimento é proporcional à intensidade sonora (QS study, 2020) .....	16
Fig. 4.3 – A frequência da vibração é proporcional à altura tonal (Schiavoni, 2016) .....	17
Fig. 4.4 – Som complexo correspondente à soma dos primeiro e terceiro harmónicos (Carrión Isbert, 1998) .....	17
Fig. 4.5 – Sinal aperiódico e inarmónico (Carrión Isbert, 1998) .....	18
Fig. 4.6 – Espectro de um ruído em que parciais se colocam em destaque na banda de 1/3 de oitava dos 500 Hz (Mateus, 2008) .....	18
Fig. 4.7 – Pulso retangular do estampido (Carrión Isbert, 1998) .....	19
Fig. 4.8 – Bandas de frequência de diversos instrumentos musicais e da voz (Carrión Isbert, 1998) .....	20
Fig. 4.9 – Variação da pressão pela passagem da onda acústica (Matos, 2018) .....	21
Fig. 4.10 – Curvas de igual sensação sonora ou isofónicas (Mateus, 2008) .....	22
Fig. 4.11 – Curvas de ponderação A, B, C (Mateus, 2008) .....	23
Fig. 4.12 – Ruído Contínuo (Mateus, 2008) .....	25
Fig. 4.13 – Ruído Intermitente (Mateus, 2008) .....	25
Fig. 4.14 – Ruído Impulsivo (Mateus, 2008) .....	25
Fig. 4.15 – Ruído Aleatório (Mateus, 2008) .....	25
Fig. 4.16 – Curvas “Noise Criteria” (Carrión Isbert, 1998) .....	26
Fig. 4.17 – Fonte Esférica Omnidirecional (Brandão, 2018) .....	27
Fig. 4.18 – Exemplo de fonte esférica (Carrión Isbert, 1998) .....	27
Fig. 4.19 – Exemplo de fonte cilíndrica (Mateus, 2008) .....	27
Fig. 4.20 – Influência do gradiente de temperatura (à esquerda) e do vento (à direita) na propagação sonora (Mateus, 2008) .....	28
Fig. 4.21 – Ecograma (Brandão, 2018) .....	31
Fig. 4.22 – Exemplo de curva ETC num ponto de um recinto (Carrión Isbert, 1998) .....	31
Fig. 4.23 – Eco flutuante (The Sound Blog, 2014) .....	32
Fig. 4.24 – Múltiplas reflexões (Barron, 2009) .....	32
Fig. 4.25 – Representação do efeito real sonoro (à esquerda) e da perceção sonora associada (à direita) (Carrión Isbert, 1998) .....	33
Fig. 4.26 – Tempo de reverberação (Mateus, 2008) .....	34
Fig. 4.27 – Aumento progressivo do SPL num ponto de um recinto após uma fonte começar a emitir energia de forma contínua (Carrión Isbert, 1998) .....	35
Fig. 4.28 – Diminuição progressiva do SPL num ponto de um recinto após uma fonte interromper a emissão de energia sonora (Isbert, 1998) .....	35
Fig. 4.29 – Relação entre o nível total de pressão sonora e a sensação subjetiva (Mateus, 2008) $L_D$ é o campo direto e $L_R$ é o campo reverberante (Carrión Isbert, 1998) .....	36
Fig. 4.30 – Comportamento do campo sonoro de acordo com o modelo utilizado na teoria revista numa sala representativa de 20 000 m <sup>3</sup> e 2 s. de RT (assume-se como referência que a 10 m da fonte o nível do som direto corresponde a 0 dB) (Barron, 2009) .....	36
Fig. 4.31 – Reflexão especular (Barron p.15, 2009) .....	38
Fig. 4.32 – <i>Image Source Method</i> , aplicação até à segunda ordem (Rathnayake & Wanniarachchi, 2019) .....	39
Fig. 4.33 – <i>Image Source Method</i> , aplicação até à ordem n (Rathnayake & Wanniarachchi, 2019) .....	39
Fig. 5.1 – Cabeça de manequim com microfones nos canais auriculares (Barron, 2009) .....	43
Fig. 5.2 – Simulação, numa sala anecoica, baseada na recreação do campo sonoro real de uma sala de concertos, através de altifalantes. Aquele diretamente à frente do ouvinte utiliza-se	

para o som direto, e os outros emitem sinais com um determinado atraso para simular as primeiras reflexões. A reverberação pode ser controlada, por exemplo, por placas de reverberação (Barron, 2009) .....	43
Fig. 5.3 – Royal Festival Hall, Corte Longitudinal (Barron, 2009).....	53
Fig. 5.4 – ITDG (Beranek, 2004).....	54
Fig. 5.5 – Diferença entre as distâncias a percorrer pelo som direto e primeira reflexão junto do palco em comparação com aquela em lugares afastados do palco, segundo a acústica geométrica (Barron, 2009) ..	55
Fig. 5.6 – Gráficos de resposta ao impulso (Beranek, 2004) .....	55
Fig. 5.7 – Relação entre o tempo de reverberação e a rapidez de duas notas tocadas consecutivamente. No gráfico A pode ver-se como a primeira nota “mascara” a segunda, devido ao elevado tempo de reverberação, enquanto que no gráfico B, as duas notas são claramente audíveis, sem, no entanto, o ambiente acústico ser demasiado “apagado” ou “morto”, o que promove o preenchimento sonoro entre ambas (Beranek, 2004) .....	59
Fig. 5.8 – Symphony Hall, Birmingham. Cortes (Beranek, 2004) .....	60
Fig. 5.9 – Symphony Hall, Birmingham, perspectiva (Martson, 2013) .....	60
Fig. 5.10 – Culture and Congress Center Concert Hall, Lucerne, perspectiva (KKL Lucerne Management AG, 2020) ...	60
Fig. 5.11 – Culture and Congress Center Concert Hall, Lucerne. Plantas e Corte (Beranek, 2004) .....	60
Fig. 5.12 – Representação gráfica dos efeitos relacionados com a sensação de espacialidade: dimensão aparente da fonte (ASW) e envolvimento (LEV) (Morimoto e Maekawa, 1989, citado por Barron, 2009)	61
Fig. 5.13 – Efeito acústico associado à difusão (linha contínua) por parte de um QRD em comparação com o efeito acústico associado à reflexão especular da mesma onda se esta incidisse numa superfície muito reflectante (Beranek, 2004).....	64
Fig. 6.1 – Determinação da área acústica total (Beranek, 2004).....	70
Fig. 6.2 – Determinação do volume (Beranek, 2004).....	70
Fig. 6.3 – Sensações sonoras associadas a uma única reflexão, de ângulo azimutal de 40°, variável em atraso e intensidade relativamente ao som direto (Barron, 2009) .....	73
Fig. 6.4 – À esquerda, a onda sonora tem comprimento menor que o tamanho da parede, dando origem a uma reflexão especular. À direita, o comprimento de onda é maior que o tamanho da superfície em que incide, tendendo a difratar (seta a tracejado). No entanto, como a superfície é adjacente de outra, formando um diedro, a onda vai refletir-se, mas não no sentido esperado (figura elaborada pelo autor).....	73
Fig. 6.5 – Técnica da elipse, com vista ao encaminhamento otimizado das primeiras reflexões por parte da envolvente (Barron, 2009) .....	74
Fig. 6.6 – Técnica da elipse aplicada no desenho de uma sala (meia planta). As elipses traçadas são dimensionadas de modo que, para a área que contêm, as reflexões cheguem com um certo atraso máximo. As superfícies refletoras devem ficar dentro de cada elipse (Barron, 2009) .....	75
Fig. 6.7 – Geometrias base caracterizadoras da história das salas de concerto (adaptada de Long, 2006).....	76
Fig. 6.8 – Concertgebouw, Amesterdão. Perspetiva do interior (Classictic, 2020).....	77
Fig. 6.9 – Concertgebouw, Amesterdão. Planta integral do piso principal e da varanda (Barron, 2009).....	77
Fig. 6.10 – McDermott Concert Hall, Dallas. Corte transversal (à esquerda) e corte longitudinal (à direita) (Long, 2006, de Beranek, 1996) .....	78
Fig. 6.11 – Efeitos das reflexões de superfícies côncavas, fora e dentro da circunferência à qual pertence a projeção da superfície (Barron, 2009) .....	79
Fig. 6.12 – Fenómenos de reflexão associados a superfícies convexas, planas e côncavas (Barron, 2009) .....	79
Fig. 6.14 – Teatro de São Carlos (Nogueira, 2015) .....	80
Fig. 6.15 – Proporções de uma sala clássica de concertos (à esquerda) em comparação com as proporções de uma sala clássica de ópera (à direita) (Long, 2006, de Beranek, 1996) .....	81
Fig. 6.16 – Reflexão de uma superfície constituinte de uma sala em leque (Barron, 2009) .....	82
Fig. 6.17 – Direcionamento lateral do campo sonoro numa sala retangular em comparação com o direcionamento numa sala em leque (Barron, 2009) .....	82
Fig. 6.18 – Wembley Conference Center. Perspetiva (Barron, 2009).....	83
Fig. 6.19 – Wembley Conference Center, força sonora nas médias frequências (Barron, 2009) .....	83
Fig. 6.20 – Wembley Conference Center, tempo de reverberação (Barron, 2009).....	83
Fig. 6.21 – Ângulo das reflexões tardias numa sala em leque com 180° de abertura (Barron, 2009).....	84
Fig. 6.22 – Reflexões do teto (Barron, 2009).....	84
Fig. 6.23 – Wembley Conference Center, valores objetivos de clareza e dimensão aparente da fonte (Barron, 2009).....	84
Fig. 6.24 – Demonstração, pela técnica IMS, do Grau de homogeneidade do campo refletido em função do ângulo de abertura da sala em leque (Barron, 2009) .....	85
Fig. 6.25 – Christchurch Town Hall, planta e cortes (Beranek, 2004).....	87
Fig. 6.26 – Christchurch Town Hall, perspectiva (Barron, 2009) .....	87

Fig. 6.27 – Christchurch Town Hall, superfícies refletoras em cada galeria (Barron, 2009) .....	87
Fig. 6.28 – Comparação entre o grau de lateralidade das reflexões numa superfície em “reverse- splay” (à esquerda) e o grau de lateralidade das reflexões numa superfície lateral de uma sala em leque (à direita) (Barron, 2009) .....	88
Fig. 6.29 – De Doelen Concert Hall, Planta integral da segunda varanda e do primeiro piso e primeira varanda, e segunda varanda (em cima), e Corte Longitudinal (em baixo) (Barron, 2009) .....	89
Fig. 6.30 – De Doelen Concert Hall, perspetiva (Gosselaar, s.d.) .....	89
Fig. 6.31 – Derivação da forma da sala De Doelen Concert Hall pelo modelo da elipse (Barron, 2009) .....	89
Fig. 6.32 – Beethovenhalle, perspetiva (World CC Boon, 2002- 2020) .....	90
Fig. 6.33 – Filarmónica de Berlim, Perspetiva (Eurnited Arts, 2020) .....	90
Fig. 6.34 – Sala de terraços em trapézio em que, para otimizar as reflexões laterais, as superfícies A, B e C deveriam ser ligeiramente inclinadas para baixo. Esquema de Cremer (1986, de Barron, 2009) .....	91
Fig. 6.35 – Musikzentrum Vredenburg, Utreque, perspetiva (Barron, 2009).....	92
Fig. 6.36 – Musikvereinsaal, Viena, perspetiva (Feixa, s.d.) .....	93
Fig. 6.37 – Salle Playel, Paris, corte longitudinal. Cada segmento AB, BC e CD direcionam a energia sonora para diferentes secções da audiência (Barron, 2009).....	94
Fig. 6.38 – Filarmónica de Hamburgo, Hamburgo, corte (wikiarquitectura, s.d.) .....	96
Fig. 6.39 – Osaka Symphony Hall, perspetiva (Osaka Convention & Turism Bureau, s.d.) .....	97
Fig. 6.40 – Takemitsu Memorial Hall, perspetiva (Tokio Opera City Cultural Foundation, s.d.) .....	97
Fig. 6.41 – Cálculo geométrico das linhas de visão (Barron, 2009) .....	99
Fig. 6.42 – New York Filarmonic Hall antes das renovações, planta e corte (Barron, 2009) .....	99
Fig. 6.43 – Cortes destacando soluções adequadas da configuração das varandas (Beranek, 2004) .....	101
Fig. 6.44 – Cortes destacando soluções desadequadas da configuração das varandas (Beranek, 2004).....	101
Fig. 6.45 – Considerações dimensionais no desenho das varandas em salas de concerto (em cima), e em salas de ópera (em baixo) (Long, 2006) .....	102
Fig. 6.46 – Valores de EDT debaixo de varandas e, função dos ângulos de visão (Long, 2006) .....	102
Fig. 6.47 – Grady Gammage Hall, Arizona, perspetiva com destaque para as varandas semisuspensas de modo a não impedir a passagem do som reverberante para os lugares abaixo (Jen There Done That, 2015) ..	103
Fig. 6.48 – Philadelphia Academy of Music (Amorosi, 2018) .....	104
Fig. 6.49 – Absorção máxima da frequência cuja quarta parte do comprimento de onda corresponde à distância entre o revestimento e a parede (Carrión Isbert, 1998).....	106
Fig. 6.50 – Ressonador de membrana (Carrión Isbert, 1998).....	106
Fig. 6.51 – Quando o revestimento poroso é fino, a absorção das baixas frequências é desprezável (Carrión Isbert, 1998).....	107
Fig. 6.52 – Eficácia da absorção nas altas frequências, por parte de um revestimento poroso e fino (Carrión Isbert, 1998).....	107
Fig. 6.53 – Coeficiente de absorção em função da porosidade (Carrión Isbert, 1998).....	108
Fig. 6.54 – Modelo dos ressoadores de Helmholtz da Filarmónica de Berlim (Carrión Isbert, 1998).....	109
Fig. 6.55 – Filarmónica de Berlim, perspetiva com destaque para os ressoadores de Helmholtz (Carrión Isbert, 1998).....	109
Fig. 6.56 – Vasos ressoadores nos teatros gregos (Vitrúvio, 2015) .....	110
Fig. 6.57 – Auditório Beethoven, Campinas (Simonetti, s.d.).....	110
Fig. 6.58 – Salzburg Festpielhaus, perspetiva (Kolarik, s.d.) .....	112
Fig. 6.59 – Salzburg Festpielhaus, perspetiva desde o palco (Caputo, s.d.) .....	112
Fig. 6.60 – Royal Festival Hall, Londres, perspetiva (Morris, 2020) .....	112
Fig. 6.61 – Liederhalle Beethovensaal, Estugarga (Alemanha) perspetiva (Trpceski, 2019) .....	112
Fig. 6.62 – Salle Playel, Paris, corte longitudinal com destaque para a integração de painéis MLS nas paredes laterais (Lagoa, 2016).....	113
Fig. 6.63 – Desempenho de um painel difusor MLS (Carrión Isbert, 1998) .....	113
Fig. 6.64 – Painéis difusores QRD unidimensionais (Carrión Isbert, 1998).....	114
Fig. 6.65 – Paineis difusor QRD unidimensionais, perfil (Carrión Isbert, 1998) .....	114
Fig. 6.66 – Esquema 3D da difusão originada por um painel QRD unidimensional, por uma onda incidente a 45° (Carrión Isbert, 1998).....	114
Fig. 6.67 – Painel difusor QRD bidimensional (Carrión Isbert, 1998) .....	114
Fig. 6.68 – Esquema 3D da difusão originada por um painel QRD bidimensional, por uma onda incidente a 45° (Carrión Isbert, 1998).....	114
Fig. 6.69 – Exemplo de painel QRD unidimensional e padrão das ranhuras (Beranek, 2004) .....	115
Fig. 6.70 – Painel da parede traseira do Tokyo Opera City Concert Hall (CBSO Centre, 2013) .....	115
Fig. 6.71 – Desempenho do Painel da parede traseira do Tokyo Opera City Concert Hall (Beranek, 2004) .....	115
Fig. 6.72 – Layout de uma orquestra (Adami, 2012) .....	118
Fig. 6.73 – Tipos de desenho de palco comuns (figura elaborada pelo autor).....	121

Fig. 6.74 – Bass Performance Hall, Texas. Plantas e Corte (Beranek, 2004).....	121
Fig. 6.75 – Bass Performance Hall, perspectiva (FDA, s.d.) .....	122
Fig. 6.76 – Avery Fisher Hall (Avery Fisher Hall, s.d.).....	125
Fig. 7.1 – Teatro de Epidauro, Grécia (Tschlis, 2020) .....	128
Fig. 7.2 – Teatro Romano, Aspendos, 155 d. C. (atual Turquia) (Apaixonados Por História, s.d.) .....	129
Fig. 7.3 – Teatro Romano, Aspendos, 155 d. C., corte (Barron, 2009) .....	129
Fig. 7.4 – Teatro Olímpico, perspectiva (Antunes, 2016) .....	130
Fig. 7.5 – Teatro Olímpico, planta (Rooth, 2017) .....	130
Fig. 7.6 – Teatro Olímpico, corte (Rooth, 2017) .....	130
Fig. 7.7 – Teatro Grimani a S. Giovanni Grisistomo (Michels, 2007) .....	132
Fig. 7.8 – Igreja de São Marcos, Veneza (Rooth, 2017) .....	134
Fig. 7.9 – Hanover Square Rooms (Regency Reader, s.d.).....	135
Fig. 7.10 – King’s theatre (Hatch, 2016) .....	135
Fig. 7.11 – King’s theatre, Londres, Planta (Barron, 2009).....	136
Fig. 7.12 – Schloss Eisenstat, Áustria (Barron, 2009).....	136
Fig. 7.13 – Redoutensaal, Viena (Korom, 2020) .....	137
Fig. 7.14 – Atles Gewandhaus, Leipzig (Barron, 2009) .....	137
Fig. 7.15 – Musikvereinsaal, Viena. Planta e corte (Barron, 2009).....	140
Fig. 7.16 – Musikvereinsaal, Viena. perspectiva (Musikverein, 2020) .....	140
Fig. 7.17 – Neues Gewandhaus, Leipzig, Plantas e corte (Barron, 2009) .....	143
Fig. 7.18 – Neues Gewandhaus, perspectiva (Gewandhaus Orchester, 2020) .....	143
Fig. 7.19 – Royal Albert Hall, Londres (Almeida, 2020) .....	146
Fig. 7.20 – Royal Albert Hall, Londres. Plantas e Corte Longitudinal (Barron, 2009).....	147
Fig. 7.21 – Royal Albert Hall, Londres, Corte da sala com a cúpula de vidro (Rooth, 2017).....	150
Fig. 7.22 – Royal Albert Hall, Londres, Corte da sala com o velário (Arad, 2011).....	150
Fig. 7.23 – Boston Symphony Hall, Boston. Perspetiva (Berkshire Choral International, 2020).....	153
Fig. 7.24 – Boston Symphony Hall, Boston. Plantas e Corte Longitudinal (Barron, 2009).....	153
Fig. 7.25 – Boston Symphony Hall, Boston, Desmontagem do pavimento utilizado na época dos concertos de inverno, para a preparação da época pop, em que são colocadas mesas no pavimento base (Boston Pops, 2011).....	156
Fig. 7.26 – Filarmónica de Berlim, Berlim. Perspetiva (Coe, 2018).....	159
Fig. 7.27 – Filarmónica de Berlim, Berlim. Planta e Corte Longitudinal (Barron, 2009) .....	160

## ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tab. 4.1 – Curvas NC recomendadas para diversos recintos conforme as atividades a neles ser realizada (Carrión Isbert, 1998).....	26
Tab. 4.2 – Tempos de reverberação recomendados para diversos recintos, de acordo com a atividade à qual são destinados (Carrión Isbert, 1998) .....	34
Tab. 5.1 – Correlação entre os parâmetros objetivos mediante estudos em 42 salas de concerto (Beranek, 2004) ..	45
Tab. 6.1 – Absorção das cadeiras em função da espessura do estofo (Long, 2006, de Beranek & Hidaka, 1998) .....	117
Tab. 6.2 – Espessuras de estofo de referência (Long, 2006, de Beranek & Hidaka, 1998).....	117
Tab. A1 – Peso dos oito atributos acústicos listados por Beranek em 1962 (Tabela traduzida de Long, 2006, p. 667).....	165
Tab. A2 – Peso dos atributos acústicos listados por Beranek em 1996 após os parâmetros emergentes dos experimentos de Ando (Tabela traduzida de Long, 2006, p. 668) .....	165



## ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

a.C. – antes de Cristo

ASW - Tamanho Aparente da Fonte (“Apparent Source Width”)

BQI – Índice de Qualidade Biaural (“Binaural Quality Index”)

BR - Razão de Baixos (“Brass Ratio”)

C<sub>80</sub> - Clareza

ca. – cerca de

cm – Centímetro (s)

D - Dose de ruído

dB – Decibel

EDT - Tempo de Decaimento Inicial (“Early Decay Time”)

Eq (s). – Equação

Fig (s). – Figura

G - Força Sonora

Hz – Hertz

IACC - Relação Cruzada Interaural (“Interaural Cross Relation”)

ITDG - “Initial Time Delay Gap”

Lae - (Parâmetro caracterizador do) Nível de exposição sonora

L<sub>D</sub> – Campo Direto

Leq - (Parâmetro caracterizador do) Nível sonoro equivalente

LEV - Envolvimento (“Listener Envelopment”)

LF- Fração Lateral (“Lateral Fraction”)

Ln - Níveis percentis

L<sub>R</sub> – Campo Reverberante

m - Metro (s)

MLS - “Maximum length sequence”

ms - Milisegundo

nº - número

N - Número de lugares numa sala

NC - Critérios de Ruído (“Noise Criteria”)

NR - “Noise Rating”

p. – Página(s)

Pa - Pascal

PNC - “Preferred noise criteria”  
PRD - “Primitive - Root Diffusor”  
Q – Fator de diretividade  
QRD - “Quadratic Residue Diffusers”  
RMS - Raíz quadrada média (“Root Mean Square”)  
RPG - “Reflection Fase Grafting”  
RT - Tempo de Reverberação (“Reverberation time”)  
s – Segundo (s)  
 $S_A$  – Área acústica da plateia  
SEL - Nível de exposição sonora  
SDI - “Sound Diffusivity Index”  
s.d. – Sem data  
 $S_o$  – Área do palco  
SPL - Nível de pressão sonora (“Sound Pressure Level”)  
 $S_T$  – Área acústica total  
ST1 - Suporte do Palco (“Stage Support”)  
t - Tempo  
T - Período  
Tab. – Tabela  
TDS - “Time Delay Spectrometry”  
V - Volume da sala  
W - Watt





# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Tema (enquadramento e justificação)

A acústica é uma característica do espaço, e, portanto, da arquitetura. É certamente comum à maioria a experiência de caminhar numa catedral e ouvir a resposta do sagrado lugar aos passos, como se prolongasse a essência do mais simples dos gestos humanos ao etéreo através do som. Maior ainda será o deslumbre com os Divinos Louvores dos Cânticos Gregorianos ou da Polifonia, ou até dos grandes órgãos cuja mensagem musical é conduzida pelas altas e esculpidas naves até às abóbadas, espalhando-se por todo o espaço como um imenso fogo invisível. Se a arquitetura responde à atividade Humana, então irremediavelmente responde ao som, porque o gesto do Homem assim o implica na constante comunicação com o que de si está fora. Assim, a arquitetura responde com beleza, significando mensagens visuais, e mensagens sonoras, podendo-se dizer que a arquitetura vê-se, escuta-se, (cheira-se, etc), sente-se, habita-se<sup>1</sup>. De entre outros carismas seus, a arquitetura é um instrumento acústico. Não obstante, quando a função de um espaço é dedicada especialmente à significação de mensagens sonoras, como é o caso das salas de concerto, então a dimensão sonora da arquitetura, ou como tantas vezes será referida ao longo do trabalho, a acústica arquitetónica, estará para a obra em geral não só como mais uma parte integrante do deleite inerente à essência do espaço, mas também como uma qualidade útil requisitada pela atividade à qual a arquitetura se destina. Assim, torna-se fundamental para o arquiteto (que, como aponta Vitruvius no *“Tratado de Arquitetura”* (Vitruvius, 2015), deve ter conhecimento sobre várias matérias de modo a acompanhar as vivências humanas dos espaços) o estudo das interferências de várias dimensões sensoriais da arquitetura nas sensações dos habitantes, particularmente quando é obrigação dos espaços em questão interferir de maneira focada em alguma dessas dimensões. A acústica arquitetónica será neste trabalho tratada como um bem essencial integrante dos projetos de recintos para a música, com particular destaque para salas de concerto. Neste sentido, uma abordagem sobre a acústica arquitetónica dentro de um contexto musical permite uma maior fruição para a aquisição de ferramentas teóricas que possam facilmente ser aplicadas na prática.

---

<sup>1</sup> O habitar aqui definido é referente à vivência da Arquitetura por parte do Homem, não só da arquitetura das habitações propriamente ditas, as quais conferem o ambiente de repouso necessário para que o Homem se prepare para as demais atividades. Assim, o ser humano habita no sentido em que vive, realiza as suas atividades, realizando-se a si mesmo, movendo-se para tal, pelo espaço arquitetónico que ele mesmo compõe.

## **1.2. Delimitação Temporal**

Este trabalho abrange uma sistematização das implicações da arquitetura na acústica das grandes salas de concerto, abordadas com vista à melhor integração da componente acústica no desenho arquitetônico. Desse modo tornou-se pertinente, para a perscruta de conhecimento prático, o estudo de espaços exclusivos para a música surgidos desde que a civilização desenvolveu a prática cultural da audição pública do concerto puramente musical, ou seja, desde o período Barroco, estendendo-se até aos dias de hoje.

## **1.3. Objetivo**

Imagine-se o seguinte cenário: o Homem, espírito dinâmico na procura de harmonia, de prazer e satisfação eternos, que vive esta sua essência humana através da modelagem constante daquilo que os seus sentidos alcançam e interiorizam, levanta muros, rasga vãos, esculpe espaço, mas de olhos cerrados, deixando-se conduzir apenas pelo som. Imagine-se que os seus olhos se vendam e apenas se abrem no fim, dando-lhe acesso a uma outra dimensão cognitiva, a visão. Refletir-se-ia nesta dimensão a harmonia dos campos sonoros cujo ideal guiou a arquitetura que agora os condiciona? Como seriam os espaços para que “soassem bem”? Qual a linguagem que serviria de ponte entre a arquitetura e a experiência sonora? Quais as geometrias, dimensões e materialidades empregadas? Responderiam ao espírito musical que sempre se manifesta como forma mais perfeita de vivência sonora?

As respostas às questões anteriores não poderão saber-se, a menos que uma cegueira contagiasse todo o mundo. Mas este é, no entanto, um imaginário que, de certo modo, conduz à idealização de geometrias e outros componentes “ótimos” de recintos construídos especificamente para manifestações musicais, cuja base de desenho seria focada na componente acústica da matéria, da arquitetura. Talvez aliás, de entre todas as equivalências arquitetônicas que se fizessem entre o mundo real e este outro de fantasia, fossem as salas de concerto ou recintos para manifestações musicais as construções que mais se assemelhariam entre si. Isto porque esses espaços em particular, que foram edificadas em e por todas as dimensões sensoriais no mundo real, dão especial atenção à dimensão da audição. Assim, o imaginário descrito ilustra o propósito deste trabalho em perscrutar-se a “organologia” das grandes salas de concerto, isto é, as relações entre a arquitetura e os campos sonoros musicais que nela e por ela, juntamente com a orquestra, são estabelecidos. Por certo que, um concerto,

qualquer que seja, apela também a atenção da dimensão visual, e os edifícios que lhe são dedicados devem contemplar a satisfação de ambas, pois que imagens e sons interpenetram-se no mesmo espaço cognitivo. Não obstante, este trabalho colocará em destaque os requisitos acústicos da arquitetura das salas de concerto.

#### 1.4. Metodologia

Com efeito, a concretização do objetivo acima enunciado foi possível por meio de um método de pesquisa gradual de várias matérias como a física do som, a essência da acústica e as suas aplicações, a interpretação sonora por parte do ouvinte, o desenvolvimento das salas de concerto, perscrutando as implicações da forma e materialidade arquitetónicas na acústica, bem como o espírito musical de várias épocas para que mais diligentemente esse desenvolvimento fosse contextualizado em função dos propósitos aos quais serve. Esta pesquisa é complementada com o estudo de casos concretos que melhor possam ilustrar a relação entre todas as matérias. Durante o processo, para além da predominante pesquisa teórica, foram de elevada contribuição conversas com músicos e experiências sonoras e musicais informais em espaços com diferentes características, para um maior grau de sensibilidade na concretização dessas relações, com vista a ir de encontro aos objetivos. Na figura 1.1 procura-se sintetizar esquematicamente este processo metodológico.

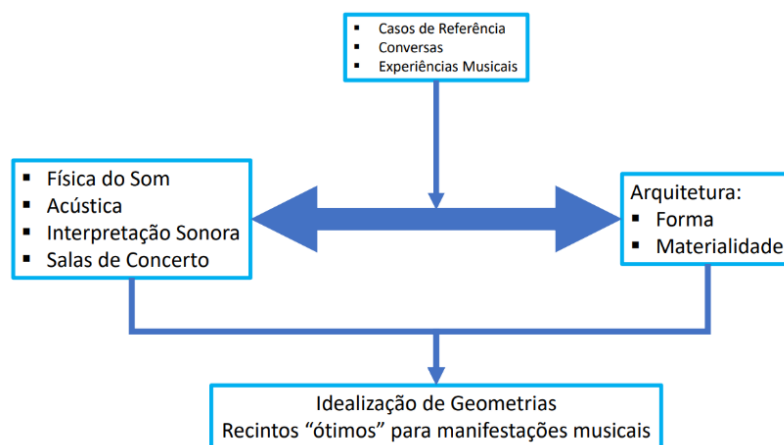


Figura 1.1 – Esquematização da metodologia (figura elaborada pelo autor)

Com efeito, a pesquisa bibliográfica assentou nos livros (já reformulados) de Beranek (2004) e Barron (2009). Complementarmente, outras obras de autores como Long (2006), que abrange matérias de entre as quais a modelação dos parâmetros acústicos, Rooth (2017), que contém

reflexões sobre o caráter sonoro da arquitetura, traduzido no deleite acústico como sendo uma das características da boa obra arquitetônica, bem como exemplos concretos da influência entre a arquitetura e as composições musicais, e Carrión Isbert (1998), que cobre questões desde a física do som ao desenho de diferentes tipologias de espaços de performance. Também Mateus (2008) e Brandão (2018) contribuíram com a revisão de importantes conceitos sobre a acústica de edifícios e de salas. Além destes, são ainda de sublinhar Michels (2003 e 2007), que trata assuntos desde a acústica musical, o ouvido e a história da música apoiada em reflexões sobre o espírito que marca os repertórios de diferentes épocas, os registos de Vitruvius (Vitruvius, 2015- tradução de Maciel) sobre as considerações e técnicas acústico arquitetônicas utilizadas nos teatros gregos e romanos, bem como sobre a essência da arquitetura. Salientam-se também as considerações sobre física da UNESCO-EOLSS (2009), as reflexões sobre a proveniência das emoções humanas de Damásio (2000), e os trabalhos de Takahashi (2010) e Lagoa (2016). Merecem ainda referência artigos (citados ao longo do texto) sobre a acústica geométrica, sobre a história do surgimento dos parâmetros acústicos, bem como inúmeras apresentações e endereços eletrônicos, por constituírem uma alargada fonte de informação da qual este trabalho se serve para alcançar o objetivo de conciliar a componente acústica da arquitetura com o desenho arquitetônico tendo em vista a otimização da experiência musical<sup>2</sup>.

### **1.5. Estrutura da dissertação**

Para além desta introdução, a dissertação adota uma estrutura clássica caracterizada por um segundo capítulo que consiste numa breve evolução histórica do estado de conhecimento, um terceiro que trata da essência da acústica e dos modelos utilizados pelo Homem como adaptação à realidade da mesma, ao que se segue o quarto, que será uma revisão da física do som, cujos conceitos apresentados serão imprescindíveis para a compreensão do restante trabalho, seguido do quinto, que colocará em evidência os parâmetros acústicos que funcionam como caracterizadores da acústica arquitetônica, depois o sexto, que será a integração desses parâmetros no desenho arquitetônico das salas de concerto, nomeadamente daquelas de grandes dimensões, promovida por meio do estudo das características formais, materiais e

---

<sup>2</sup> Os instrumentos musicais constituem matéria de estudo da organologia. Analogamente, a sala de concertos é estudada em termos acústicos, como se fora um instrumento musical. Tal como um instrumento musical é afinado, ajustando as dimensões das cordas e do braço (no caso dos cordofones), ou o tamanho dos tubos e posicionamento dos orifícios (no caso dos aerofones e aerofones de teclas), um recinto para a música deverá ter as suas proporções e dimensões afinadas, neste caso, não com a finalidade de manifestar notas musicais afinadas entre si, mas conduzi-las ao ouvinte de tal modo que a sua experiência seja o mais aprazível possível.

dimensionais em relação com o campo sonoro, ilustrado com casos concretos quando assim se justificar, e, por fim, o sétimo propiciará uma contextualização histórico musical do desenvolvimento dos espaços para a música, com destaque para as grandes salas de concerto construídas a partir do século XIX, de entre as quais algumas servirão como casos de referência. Ainda, no final do trabalho apresentam-se três anexos com informação que está referenciada no texto.



## 2. BREVE EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO ESTADO DO CONHECIMENTO

As várias vertentes nas quais a disciplina Acústica se divide atualmente emergiram do conceito físico que define o som como uma perturbação ondulatória gerada por uma fonte e que precisa de um meio material para se propagar. Na realidade, o som é primeiramente uma sensação, e essa sensação é que é causada por uma onda. Mas, para simplificar, a própria onda será chamada som.

O início da teoria ondulatória remonta a pensadores como Chrysippus (c. 279 a.C.-276 a.C.) e outros, mas destes não se conhecem registos escritos. Todavia, o arquiteto romano Vitruvius teria de gravar no “*Tratado de Arquitetura*” a compreensão da sua época. Vitruvius assume que a voz se propaga em círculos como as ondas de água, mas na vertical, e explica o campo sonoro nos teatros gregos e romanos com base nessa ideia, o que já não corresponde ao estado de conhecimento atual, ainda que este tenha sido alcançado pelo conjunto do seu trabalho e do de outros autores seus procedentes como Marin Mersenne, Isaac Newton, etc... (UNESCO-EOLSS, 2009).

Um trabalho que viria a ser importante na aplicação do conhecimento acústico na arquitetura do século XX foi a introdução (no século XIX por Reynolds e Rayleigh) do conceito de raio de onda como representação de fenómenos ondulatórios. Rayleigh (1877) chegou mesmo a publicar uma revisão de alguns cuidados acústicos (tratando-se de sugestões muito genéricas) a ter na arquitetura:

*In connection with the acoustics of public buildings there are many points which remain obscure. ... In order to prevent reverberation it may often be necessary to introduce carpets or hangings to absorb sound. In some cases the presence of an audience is found sufficient to produce the desired effect*

(Rayleigh, 1877; citado por Barron, 2009, p. 5)

Também em relação a uma revisão mais focada no desenvolvimento dos espaços para a música, são de prezar os trabalhos sobre teatros e óperas existentes no séc. XVIII, que Dumont (1774) compara através de plantas e cortes. Também propõe soluções, ainda que baseadas em grandes tetos abobadados que hoje (pelo menos só por si) não seriam aceites como propostas de boa acústica. Para além deste autor, outros se esforçaram por rever o estado da arte, como Louis (1782; citado por Barron, 2009), que compara plantas de vários teatros do século XVIII (fig. 2.1),

Forsyth (1985), que se torna pioneiro na revisão das tipologias das salas de concerto, entre outros.

Apesar das contribuições destes autores, até ao início do século XX a acústica arquitetónica padecia ainda da falta de bases científicas concretas que pudessem ser desde logo aplicadas na prática.

Seria necessário um estudo incidente nas relações entre os parâmetros arquitetónicos e as sensações dos espectadores. Mas como isolar componentes da experiência musical subjetiva, sobre as quais se pudesse, com recurso a modelos, criar estruturas parametrizáveis que (quando relacionadas) caracterizassem o todo que é a sensação subjetiva de cada pessoa?

No fim do século XIX, Sabine haveria de dar o primeiro de muitos passos, através da quantificação da sensação de reverberação (quantificação essa caracterizada pelo tempo de reverberação), acontecimento que ficou até hoje gravado na história do Boston Symphony Hall, a primeira sala de concertos construída com bases científicas objetivas. No entanto, a sua morte prematura em 1919 impediu a sua contribuição para novos progressos (Barron, 2009; Beranek, 2004).

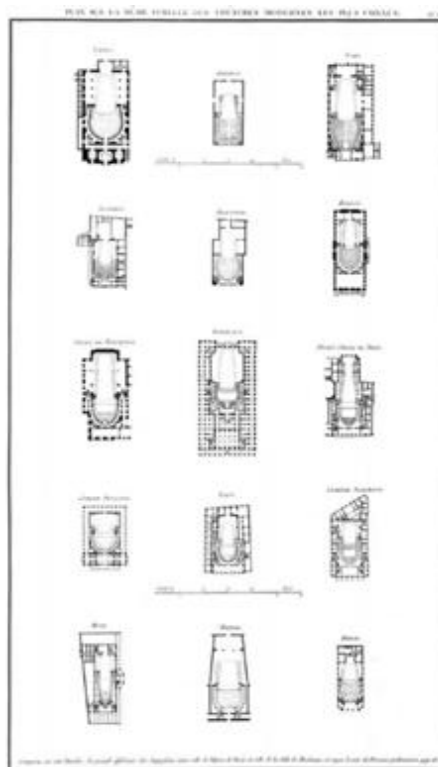


Fig. 2.1 – Comparação de plantas de vários teatros do séc. XVIII (Barron, 2009)

Na década de 1930 os contributos de Bagenal e Wood (1931) e Knudsen (1932) consolidavam o progresso científico. No entanto, a qualidade das salas de concerto que estavam a ser construídas nesse tempo demonstravam a necessidade de avanços na pesquisa (Barron, 2009).

Na segunda metade do século XX, ensaios científicos subjetivos e questionários revolucionaram a aplicação da acústica na arquitetura. Agora, estava presente que cada solução arquitetónica possível interferia com uma experiência multidimensional própria de cada espectador, e os campos de som direto e refletido, condicionados pela arquitetura, tornaram-se os moduladores dos vários parâmetros acústicos objetivos que quantificavam as sensações subjetivas. É de destacar o trabalho de Beranek (1962), cujo estudo resulta de uma intensa pesquisa de 54 salas de concerto e de ópera pelo mundo. Destaca-se pela primazia na apresentação de parâmetros quantificadores das qualidades acústicas subjetivas. O seu trabalho iria ser o precursor de muitos autores como Barron (1993), posteriormente editado com reformulações, Long (2006), e tantos outros. A acústica arquitetónica apoia-se ainda hoje nesses estudos, tendo como base a noção da multidimensionalidade da experiência musical.



### 3. A ESSÊNCIA DA ACÚSTICA E OS MODELOS DE ADAPTAÇÃO À REALIDADE

Desde que reza a história que o Homem se aproveita das qualidades acústicas do espaço para gerir a sua vida. Nas grutas pré-históricas de Chauvet, França, foram encontradas pinturas rupestres de 32 000 a.C. em pontos estratégicos de enormes e ramificadas grutas. Não por acaso, em 2008, cientistas acústicos descobriram que eram esses os pontos de maior projeção para os diversos braços escuros do complexo rochoso (Alves 2a, 2017). A apropriação espacial pela audição é uma ferramenta de sobrevivência desde que o Homem tem de interagir com o exterior. Além disso, a audição apropria-se do espaço que os olhos não alcançam. Uma criatura na selva percebe, mediante o som produzido pelo movimento da folhagem, a ameaça do predador obscurecido da vista pela vegetação.

Desde a antiga Grécia que o conhecimento acústico é aplicado na arquitetura. Eram escolhidos terrenos estratégicos para as construções dos teatros, longe do ruído, e nas vertentes dos vales, contra a brisa. Era comum colocar-se vasos ressonantes de bronze em certas fileiras, dispostos de acordo com as teorias gregas da consonância<sup>3</sup> para auxiliar a voz vinda do palco. Como, segundo o conhecimento atual, o efeito de ressonância pode ser ouvido até cerca de 1 m de distância do vaso (nas frequências de ressonância), e os teatros eram muito grandes, era um sistema perpicaz que, o que poderia ter de menos benéfico era promover a sensação da localização de uma segunda fonte sonora, uma vez que funcionava como as colunas de som dos tempos modernos. Estas estratégias acústicas e outras foram explicadas pelo arquiteto romano Vitruvius (Vitruvius, 2015) mas os seus argumentos são atualmente substituídos por abordagens mais esclarecidas e esclarecedoras em relação às ciências físicas. Antes de Vitruvius não há registos de nenhuma outra obra que reveja a ciência da acústica arquitetónica. Porém, a teoria musical da escola de Pitágoras (Fig. 3.1) deixa os registos de Aristoxeno sobre a acústica musical que lhe servirão de base, e que servirão de base às formulações científicas em geral das épocas posteriores, cuja filosofia do ensino assentará na teoria da Música das Esferas. Tal teoria assume que os acontecimentos cósmicos, como o movimento dos astros, podem ser explicados através de modelos matemáticos que transpõem em símbolos visuais as relações inerentes e necessárias ao deleite musical, pois também esse movimento é um fenómeno real musical, embora Aristóteles se tenha oposto com o argumento da ausência de atrito no Cosmos.

---

<sup>3</sup> Acreditava-se que a disposição proporcional à das notas nos instrumentos musicais, de modo a produzir acordes, promoveria o deleite sonoro

Johannes Kepler (1571-1630), um astrónomo renascentista especulava sobre que planeta cantava o baixo, o tenor, o soprano, etc... (Michels, 2003; Barron, 2009; Vitruvius, 2015).

Esta noção de um todo harmonioso e musical não é surpreendente, visto que o Homem interage com o que o rodeia, e o faz através dos sentidos, que funcionam como janelas a partir das quais cria uma imagem de si mesmo e do mundo. Imagem essa subjetiva, com um fundo de objetividade que é a existência concreta do fora e do dentro. Assim, para que o Homem se sinta bem, tem de perceber uma relação de harmonia entre o fora e o dentro. Quando essa relação é estabelecida, a sensação é prazerosa e de deleite. Isto é o que acontece quando se está perante uma obra de arte ou se escuta uma música que desperta no espectador um estado de espírito particular, que varia de pessoa para pessoa conforme a sua vivência e memória física e psicológica. Damásio (2000) explica o estado de espírito como uma imagem do corpo em constante relação com estímulos externos. *“E uma das coisas que ajuda os outros na vida é a expressão da beleza. Um artista é um apóstolo da beleza que ajuda os outros a viver.”* (Papa Francisco, citado por Wenders, 2018). Estas reflexões explicam a necessidade da criação e manutenção de ambientes propícios à manifestação de um fenómeno que desde o início dos tempos se tem vindo a mostrar da maior importância para a sobrevivência e vivência do Homem, a música.



Fig. 3.1 – Da esquerda para a direita e de cima para baixo: martelos na ferraria de Jubal; Pitágoras quantifica o peso dos sinos e dos copos cheios de água; Pitágoras experimenta pesos no final de cordas de comprimento fixo e Pitágoras experimenta, com Filolau o comprimento de flautas para determinar as proporções exatas de sons consonantes (Beale, 2002)

Posto isto, é fácil perceber a necessidade sentida pelo homem em criar instrumentos que lhe permitam representar de modo fiável o campo acústico. Como em todas as ciências, ele fê-lo e fá-lo por meio de modelos. A realidade é extremamente complexa, pois que a variável tempo, uma vez intrínseca a toda a existência, torna todos os acontecimentos únicos e inalcançáveis (no sentido em que são irrepetíveis). Não obstante, a sua força existencial (do tempo) e presença na manifestação de todas as coisas, incluindo na manifestação do Homem, permite que esses acontecimentos inalcançáveis sejam absorvidos pelo tecido, também ele temporal, da sua existência (do Homem), uma vez que esta neles (nos acontecimentos) esteja integrada. Assim, o Homem os transpõe (aos acontecimentos), através da memória, em modelos mais simples e constantes naquilo que descrevem, como os modelos matemáticos, analógicos, os digitais, etc...



## 4. A FÍSICA DO SOM

A Arquitetura dos espaços dedicados a manifestações musicais, particularmente a partir do fim do século XIX, quando se começa a construir com base em componentes parametrizáveis caracterizadoras da experiência musical subjetiva, foi adquirindo uma maior versatilidade formal e material. É assim necessário, para entender a “arquitetura” dos campos sonoros no tempo e no espaço, a qual está por detrás da arquitetura propriamente dita, entender a física do som. Como tal, os conceitos que derivam desse entendimento serão necessariamente utilizados nos capítulos posteriores, pelo que se torna importante explicá-los inicialmente.

### 4.1. Teoria Ondulatória

O movimento oscilatório conferido a um corpo (por exemplo, a impulsão dada a um diapasão) é responsável pela produção do som. As características principais do movimento vibratório transmitido pelo corpo à vizinhança que o separa do recetor, como amplitude e frequência, estão associadas às sensações sonoras que os humanos experienciam (Chagué, 2001). Esse movimento é descrito na física por meio da teoria ondulatória, a qual, tal como o nome indica, descreve o som como uma onda mecânica<sup>4</sup> originada por uma sucessão de compressões e dilatações das moléculas do meio material contíguo à fonte (fig. 4.1). Trata-se, portanto, de uma alternância de estados de pressão numa mesma zona do espaço, que provoca a alteração do estado de pressão das zonas adjacentes (Chagué, 2001; Arbonés & Milrud, 2018). Ao longo da propagação, uma fração da energia transportada vai-se dissipando sob a forma de calor, levando a um decréscimo progressivo da amplitude da onda e, conseqüentemente, a energia vai-se tornando cada vez mais fraca à medida que a distância entre a fonte e o recetor aumenta (Chagué, 2001; Carrión Isbert, 1998; Brandão, 2018).

---

<sup>4</sup> A onda mecânica necessita de um meio material para se propagar

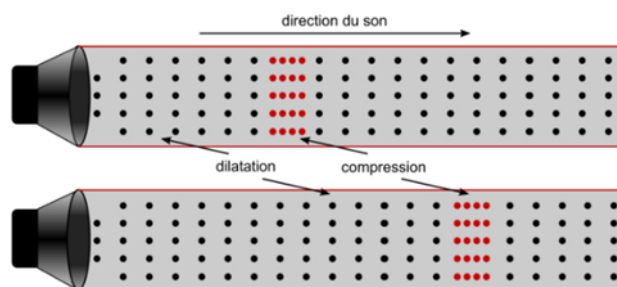


Fig. 4.1 – Propagação das ondas sonoras (Assistance Escolaire, 2000-2020)

#### 4.1.1. Movimento Oscilatório Simples: Sinusoide

A onda sonora (no caso de um tom puro, periódico, como aquele produzido por um diapasão) pode ser representada graficamente por meio de uma sinusoide<sup>5</sup>.

Segundo Chagué (2001) tem-se em particular que:

- A Amplitude do movimento corresponde à sensação de intensidade sonora, ou seja, a quantidade de energia acústica transportada pela onda sonora por unidade de tempo – quanto maior for amplitude da onda, maior é o volume sonoro (fig. 4.2);

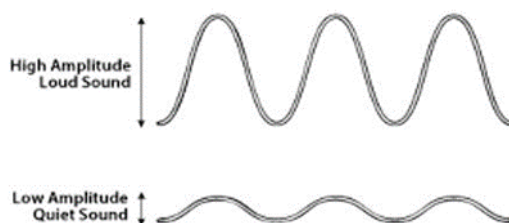


Fig. 4.2 – A amplitude do movimento é proporcional à intensidade sonora (QS study, 2020)

- A Frequência da vibração corresponde à sensação de altura tonal – baixas frequências de vibração produzem sons graves e altas frequências de vibração produzem sons agudos (fig. 4.3);

<sup>5</sup> Na verdade, uma sinusoide indica um sinal de duração infinita. É evidente, que “em termos da realidade”, infinita deverá significar com duração bastante maior que a duração do tempo de observação. No entanto, por norma, a duração do sinal de um diapasão é inferior ao tempo de observação. Assim, assumir-se-á sempre que for referida a representação de um sinal por meio de uma sinusoide ou de sobreposição de sinusoides, que o sinal observado é de duração superior ao tempo de observação, pois, em caso contrário, deveria ser representada a diminuição da amplitude da onda quando o som enfraquece até parar

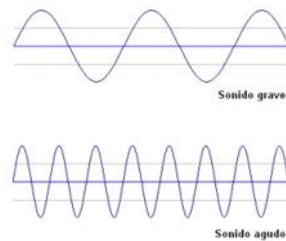


Fig. 4.3 – A frequência da vibração é proporcional à altura tonal (Schiavoni, 2016)

#### 4.1.2. Movimento Oscilatório complexo

Como foi tratado, as ondas sonoras que são traduzidas graficamente por uma única onda sinusoidal constituem tons puros. Apenas diapasões e programas informáticos produzem tons puros. A maioria dos sons que se ouvem são complexos, ou seja, são decomponíveis em séries (somadas) de sons puros, no caso dos sinais periódicos, ou apenas em termos de integral, isto é, compreendendo todo o domínio de frequências, no caso de sons não periódicos (Michels, 2003).

##### 4.1.2.1. Sinais periódicos e harmónicos: Tom Puro, Tom natural e Som harmónico

Os sinais periódicos podem então ser representados graficamente por uma curva complexa com sobreposição de muitas sinusoides (fig. 4.4), as quais correspondem aos harmónicos e à fundamental. A fundamental define a altura da nota percebida, enquanto que os harmónicos ou parciais, mediante a sua composição, e com o reforço de ressonância de alguns parciais (de que é responsável a fonte sonora), definem o timbre (Michels, 2003).

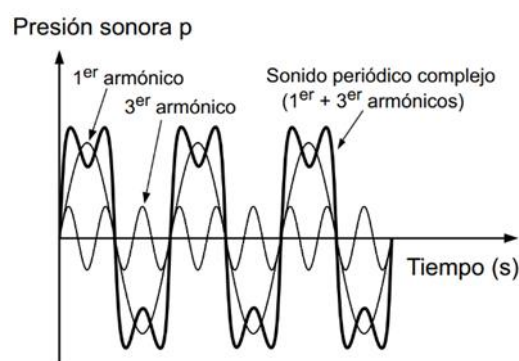


Fig. 4.4 – Som complexo correspondente à soma dos primeiro e terceiro harmónicos (Carrión Isbert, 1998)

A dinâmica também é responsável pelo timbre (Michels, 2003).

Os sons parciais podem ser captados ou calculados através da curva de sobreposição e ser representados no espectro sonoro (Michels, 2003).

Para se ouvir um tom natural, como uma nota musical, a composição dos harmónicos tem de verificar uma relação de números inteiros entre o número das suas oscilações, como 1:2:3 (Michels, 2003).

Também nos acordes, por exemplo, que são formados por vários *tons naturais*, isto tem de acontecer. As várias notas, para soarem de modo agradável (consonância), têm de soar harmonicamente, originando um som harmónico (Michels, 2003).

Resumidamente, tons puros compõem o tom natural, e vários tons naturais compõem o som harmónico (Carrión Isbert, 1998; Michels, 2003).

#### 4.1.2.2. Sinais aperiódicos e inarmónicos: Ruído

Os sinais aperiódicos e inarmónicos também podem ser representados por uma complexa curva de sobreposições, mas de ondas *aperiódicas*, não de sinusoides, e a relação numérica entre as suas oscilações expressa-se em proporções fracionárias (*sucessão inarmónica*), como 1:1,1:2,2... (fig. 4.5).

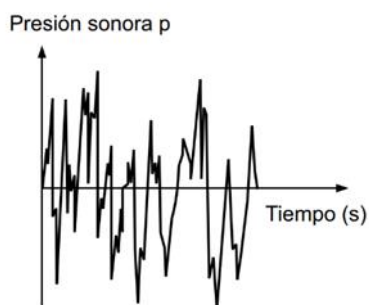


Fig. 4.5 – Sinal aperiódico e inarmónico (Carrión Isbert, 1998)

Não se determina com exatidão a altura destes sinais, porque há parciais que se colocam muito em destaque (fig. 4.6) (Carrión Isbert, 1998; Michels, 2003). Grande parte dos sinais que se consideram ruído, como o barulho de fundo num centro comercial, etc, têm esta caracterização.

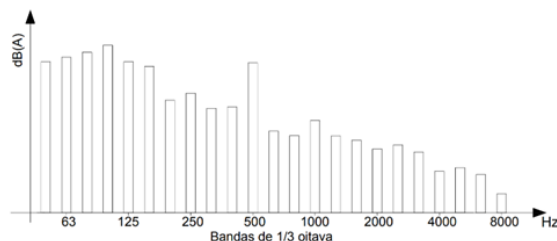


Fig. 4.6 – Espectro de um ruído em que parciais se colocam em destaque na banda de 1/3 de oitava dos 500 Hz (Mateus, 2008)

### a) Estampido

O estampido é também um sinal aperiódico e inarmónico, mas é caracterizado por um impulso repentino e breve (fig. 4.7). Este tipo de som também pode ser descrito como som transitório (Carrión Isbert, 1998; Michels, 2003).

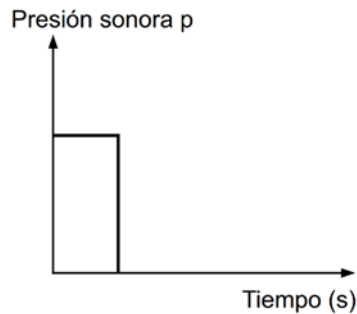


Fig. 4.7 – Pulso retangular do estampido (Carrión Isbert, 1998)

## 4.2. Sistemas de medição

### 4.2.1. Bandas de Frequência

Banda de frequências é um conjunto de frequências limitado superior (som agudo) e inferiormente (som grave). Por exemplo, a banda de frequências audíveis para o ser humano situa-se entre 20 Hz e 20000 Hz (20 kHz). As frequências superiores ao limite máximo e inferiores ao limite mínimo denominam-se ultrassons e infrassons respetivamente.

A sensação sonora provocada por um som nem sempre é linear em relação às variações de frequência. Por exemplo, o ouvido humano responde de forma aproximada às diferentes bandas de oitava<sup>6</sup>. Por esse facto, quando se fazem testes acústicos, para a medição da “resposta ao impulso”<sup>7</sup> é emitido um conjunto de sons que correspondem a um terço de oitava, embora possa, por vezes, escolher-se a oitava completa, sendo que, no entanto, quanto mais pequena for a banda, mais rigorosa é a medição, pois a resposta, nas várias bandas, é aproximada, mas não igual. Também se pode optar por emitir um estampido e analisar a resposta por bandas de frequência. A única razão pela qual não se faz testes com uma frequência de cada vez prende-se com a dificuldade de tal tarefa, pois para medir a resposta a cada frequência audível

<sup>6</sup> Por exemplo, os sons entre as frequências de 125 Hz e 250 Hz, bem como entre as de 500 Hz e 1000 Hz correspondem a uma oitava. A designação de oitava remete aos tempos de Pitágoras, que descobriu que a relação 2:1, ou seja, uma frequência duplicada, dá início a um novo ciclo das mesmas sete notas naturais, mas numa oitava acima (mais agudo), sendo que, do mesmo modo, uma frequência reduzida a metade marca o início de um novo ciclo das mesmas notas uma oitava abaixo (mais grave)

<sup>7</sup> A resposta da sala ao impulso sonoro. Este chega ao ouvinte de modo direto e refletido. A resposta da sala é o som refletido, que deve ser uniforme em toda a sala, para assim ser uniforme a percepção sonora

demoraria muito tempo. Agrupar em bandas é mais prático e é um método eficaz (Passeri Acústica e Arquitetura, 2018).

Os diversos instrumentos musicais alcançam diferentes extensões<sup>8</sup>. Por exemplo um piano emite frequências fundamentais na banda entre 27.5 Hz e 4400 Hz (ver fig. 4.8).

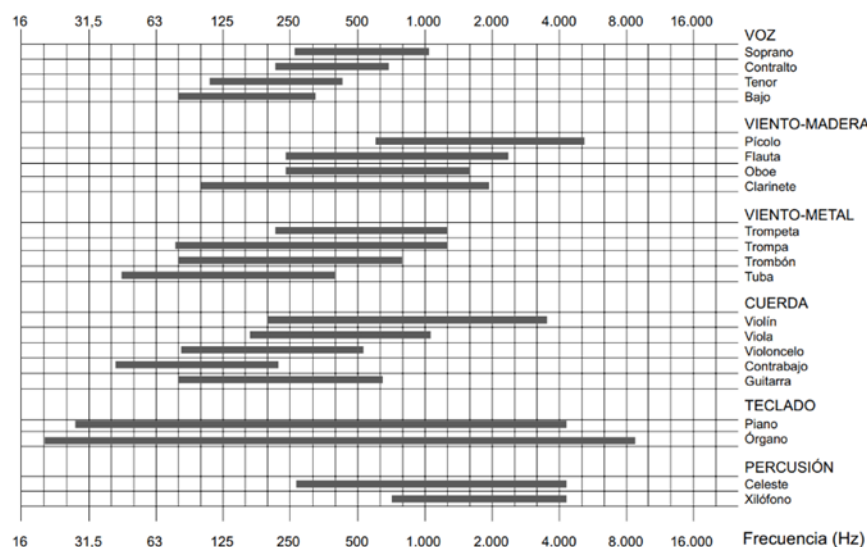


Fig. 4.8 – Bandas de frequência de diversos instrumentos musicais e da voz (Carrión Isbert, 1998)

Grande parte das vezes, para a referência de uma banda de frequência, utiliza-se a frequência central, obtida a partir da raiz quadrada do produto dos limites superior e inferior (Carrión Isbert, 1998; Mateus, 2008).

#### 4.2.2. Magnitudes sonoras

Potência, intensidade e pressão sonoras são grandezas físicas do campo sonoro.

A potência (em W) é um parâmetro que diz respeito apenas à fonte. Pode dizer-se que é a quantidade de energia que uma fonte irradia por unidade de tempo. Admitindo a concepção modular da propagação dessa energia como uma onda, pode dizer-se que a passagem da onda na vizinhança de um ponto do espaço provoca a vibração das moléculas do ar circundante, alterando instantaneamente a pressão atmosférica. A pressão resultante tem assim duas componentes (fig. 4.9):

- Componente estática correspondente à pressão atmosférica;

<sup>8</sup> Extensão de um instrumento musical define as notas possíveis de tocar. Por sua vez, tessitura ou registo designa o âmbito frequencial mais comumente utilizado por determinado instrumento (Borges, 2019)

- Componente dinâmica gerada pela passagem da onda acústica<sup>9</sup> (Chagué, 2001).

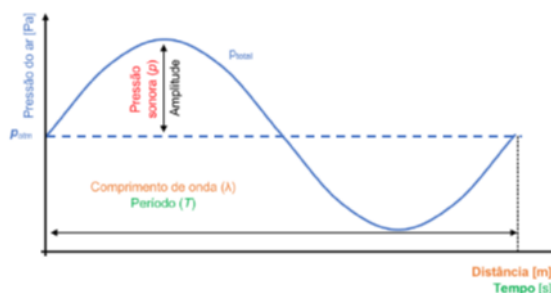


Fig. 4.9 – Variação da pressão pela passagem da onda acústica (Matos, 2018)

A taxa de variação temporal da energia (potência) na área do tímpano (intensidade sonora), é então percebida pelo ouvinte, permitindo caracterizar o som como fraco ou forte.

Quanto maior a potência de uma fonte, mais força as moléculas vão exercer umas sobre as outras (pressão), originando uma sensação de maior intensidade sonora (Michels, 2003; Prata-Shimoura et al., 2004).

As três grandezas têm uma grande faixa de variação e são representadas em potências de 10 numa escala linear. Assim, para facilitar o manuseamento de tais parâmetros, são utilizadas escalas logarítmicas relativas a uma referência, em dB. Estas escalas, para além de serem mais fáceis de utilizar, também se aproximam mais da resposta do ouvido humano ao som.

#### 4.2.3. Nível de Pressão Sonora: SPL

A pressão sonora é o parâmetro verdadeiramente mesurável a partir do qual são obtidos os valores de SPL em testes acústicos. É medida em Pa, sendo que o ser humano pode ouvir sons com pressões entre entre  $2 \times 10^{-5}$  Pa e 20 Pa.

No entanto, e como já foi referido no ponto anterior, uma escala linear com tão larga faixa de variação é muito trabalhosa no manuseamento, para além de que o ouvido humano não responde de forma linear à pressão, sendo que a função logarítmica representa melhor essa resposta<sup>10</sup>. Por exemplo, um som grave a certa pressão, parece ser mais fraco que um som agudo à mesma pressão. Desse modo convencionou-se o uso do dB logarítmico, calculado a partir da

<sup>9</sup> Até variações de pressão elevadas para o Homem são pequenas quando comparadas com a pressão que a atmosfera exerce sobre a terra. Por exemplo, a pressão de 20 Pa é 5065 vezes inferior à pressão atmosférica normal ao nível do mar (Michels, 2003; Prata-Shimomura, et. al., 2004)

<sup>10</sup> Como se verá em 4.2.4, é, ainda assim, necessário ajustar os resultados logarítmicos através de outros modelos caracterizados por curvas de ponderação

pressão observada no ar em relação à pressão mínima de  $2 \times 10^{-5}$  Pa. A expressão matemática pode ser encontrada em diversas fontes, de entre as quais, Prata-Shimoura *et al* (2004).

Ao valor obtido a partir da transformação da pressão, chama-se nível de pressão sonora ou SPL. (Carrión Isbert, 1998; Mateus, 2008; Michels, 2003; Prata-Shimomura *et al.*, 2004).

#### 4.2.4. Curvas de ponderação

Como já foi referido, a sensação sonora não é linear com a pressão, sendo necessário fazer-se uso de uma escala logarítmica que relaciona a pressão medida com a pressão de referência.

A figura 4.10 ilustra isofónicas ou curvas de igual sensação sonora.

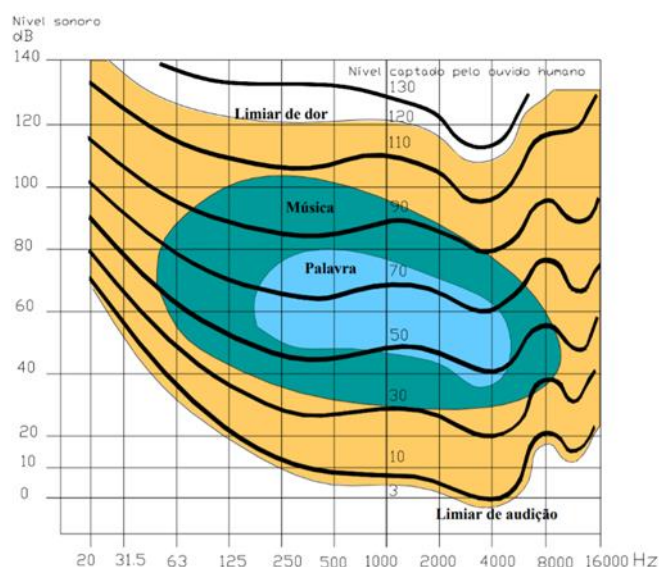


Fig. 4.10 – Curvas de igual sensação sonora ou isofónicas (Mateus, 2008)

No entanto, embora o SPL reflita melhor a sensação sonora do que a pressão sonora, há zonas da função logarítmica que ainda assim precisam de ser ajustadas ou ponderadas.

As curvas de ponderação A, B e C (utilizadas para níveis baixos - isofónica de 40 dB; médios - isofónica de 70 dB e altos - isofónica de 100 dB, respetivamente)<sup>11</sup> vão indicar qual a ponderação a fazer para cada banda de frequência. Por exemplo, como se pode ver na figura 4.11 (curvas de ponderação), a curva de ponderação A, para a banda de 40 Hz, subtrai 35 dB ao nível de pressão medido. Se esse nível for baixo, a ponderação aproxima-o da resposta do ouvido Humano, mas,

<sup>11</sup> Também havia a curva D, utilizada exclusivamente para controlar impacto do ruído dos aviões nas cidades. Esta curva subia a intensidade da percepção para as frequências a partir da ordem dos 4000 Hz, mas hoje em dia, uma vez que há muito mais ruído nas cidades que mascara o ruído dos aviões, e o ouvido humano está habituado, não se usa, sendo que, na realidade, quase só se utiliza a curva A

se for alto, a ponderação conduz a um valor mais baixo do que a sensação. Para níveis altos de SPL, a redução terá de ser mais pequena, como a curva C (Carrión Isbert, 1998; Mateus, 2008; Michels, 2003; Prata-Shimomura et al., 2004).

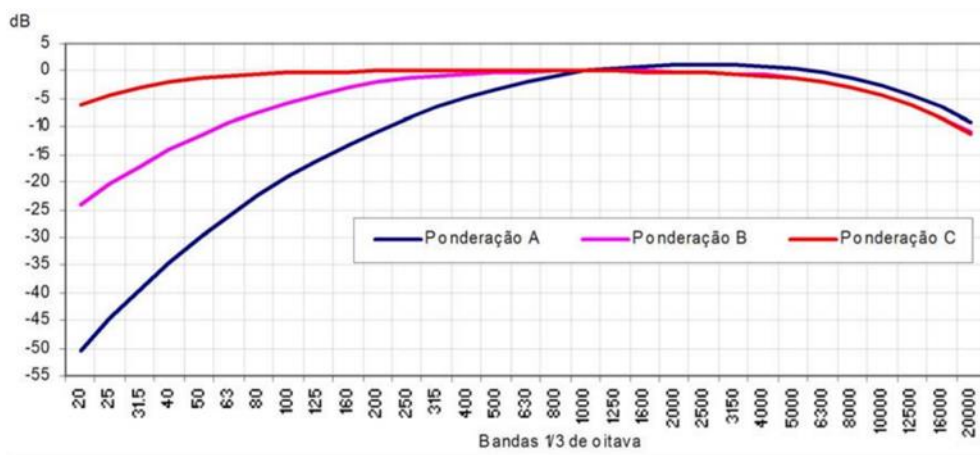


Fig. 4.11 – Curvas de ponderação A, B, C (Mateus, 2008)

#### 4.2.5. Indicadores de ruído

Uma característica muito importante numa sala de concertos é o nível de ruído de fundo. A sala tem de ser bem isolada para que o ruído do exterior, ou mecanismos de condicionamento ambiental internos, não interfiram com a atividade musical.

As curvas de ponderação serão o modelo utilizado pelos sonómetros<sup>12</sup> para a avaliação do ruído de fundo, e uma vez que o ruído não tem, por norma, níveis demasiado altos, a curva A é a mais adequada para a filtragem.

Em conformidade com aquilo que se pretende avaliar, podem-se obter valores através dos seguintes modelos indicadores de ruído (Mateus, 2008, pág. 7; Torres & Gama, 2005, p. 197):

- Nível sonoro equivalente ( $L_{eq}$  em dB ou  $LA_{eq}$  em dB (A)), que é o valor médio de energia sonora num intervalo de tempo, que corresponde à globalidade do ruído que varia dentro desse mesmo intervalo. Outros valores indicadores da exposição dos trabalhadores ao ruído bem como de ruído ambiental são determinados a partir do nível sonoro equivalente. É o medidor mais comumente utilizado em salas de concerto (Mateus, 2008, p. 7; Torres & Gama, 2005, p. 197);

<sup>12</sup> Ou outros analisadores integradores com análise em frequência

- Dose de ruído ( $D$ ), em percentagem e numa escala linear dependente do  $LA_{eq}$  (100% da dose de ruído corresponde a  $LA_{eq} = 87\text{dB (A)}$  durante oito horas) (Mateus, 2008, pág. 7; Torres & Gama, 2005, p. 197);
- Nível de exposição sonora, SEL ( $L_{ae}$ ), que é o nível constante que caracteriza durante um segundo a mesma energia global do ruído medido com ponderação A. É útil para comparar ruídos de duração diferente (Torres & Gama, 2005, p. 197);
- Níveis percentis ( $L_n$ ), que traduzem o nível de pressão sonora (A) ultrapassado em n% do intervalo de tempo considerado na medição (T) (Mateus, 2008, p. 7; Torres & Gama, 2005, p. 197);
- Níveis sonoros instantâneos (SPL), que estão na base dos outros indicadores e pode ser o ponto de partida para a obtenção posterior de alguns. Alguns sonómetros, para além de fornecerem o valor instantâneo (por exemplo para  $T = 1\text{ s}$ ) que corresponde a toda a gama de frequências audível, permitem a obtenção de multiespectros, em que, por exemplo, em cada segundo se adquire o nível sonoro instantâneo naquela frequência (Carrión Isbert, 1998; Mateus, 2008, p. 7; Torres & Gama, 2005, p. 19).

#### 4.2.6. Medição de ruído e tipos de ruído

Estes indicadores são, por norma, o resultado da média (RMS- Root Mean Square) do ruído em certos intervalos de tempo, que varia consoante o tipo de ruído a caracterizar (Mateus, 2008).

De um modo geral há quatro tipos de ruído, classificados segundo a variação temporal dos níveis sonoros. A eles associam-se três tipos de medições, cujos intervalos de tempo entre os quais são realizadas são os denominados tempos de resposta (Mateus, 2008).

São eles:

- O ruído Contínuo ou estacionário, por exemplo, no caso do ar condicionado (fig. 4.12), que pode ser lido em resposta lenta (slow) de cerca de 1 segundo. Nas salas de concerto, estes e outros dispositivos podem originar este tipo de ruído (Mateus, 2008);
- O ruído Intermitente (fig. 4.13), com diversos patamares, como algumas arcas congeladoras mais antigas, cuja amostra pode ser obtida através de leituras de resposta rápida (fast), em intervalos de cerca de 125 ms (Mateus, 2008);

- Impulsivo, com breves picos intercalados com intervalos de tempo alargados de ruído de baixo nível sonoro (fig. 4.14). Para a caracterização deste tipo de ruído recorre-se a leituras em modo impulsivo (impulse), retiradas em intervalos de 35 ms (Mateus, 2008);
- Aleatório, de grande e acentuada variação, como ocorre na maior parte dos casos (fig. 4.15). Quanto mais pequeno o intervalo entre as medições melhor, sendo o mais adequado o modo impulse (Mateus, 2008);

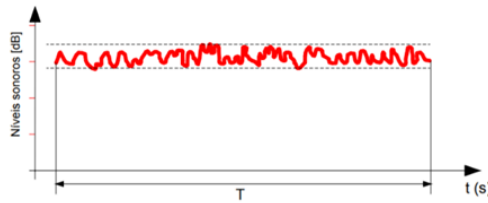


Fig. 4.12 – Ruído Contínuo (Mateus, 2008)

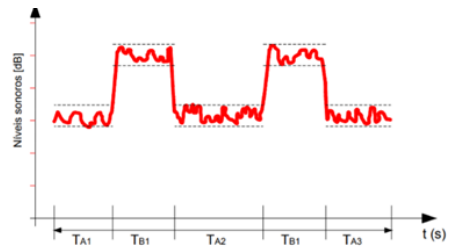


Fig. 4.13 – Ruído Intermitente (Mateus, 2008)

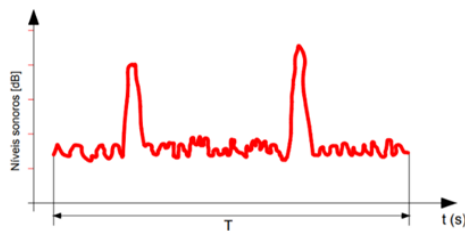


Fig. 4.14 – Ruído Impulsivo (Mateus, 2008)

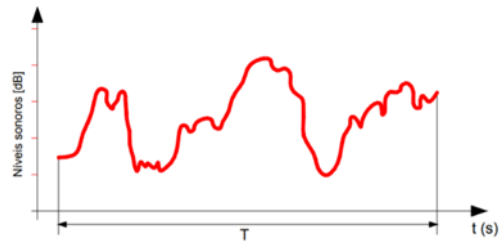


Fig. 4.15 – Ruído Aleatório (Mateus, 2008)

Convém que o intervalo de tempo das amostras seja adequado para representar a situação a caracterizar (Mateus, 2008).

No primeiro tipo de ruído, amostras de curta duração podem bastar para o caracterizar, mas quanto aos ruídos intermitentes e aleatórios, as amostras terão de ser maiores, embora, uma vez conhecidos os ritmos de emissão das fontes, se possam reduzir consideravelmente. Quanto ao ruído aleatório, é mais difícil, sendo, por vezes, necessária a medição em contínuo durante todo o intervalo de tempo a estudar (Mateus, 2008).

As medições podem ser efetuadas ou considerando o ruído global, ou isolando-o em bandas de frequência, havendo para tal sonómetros com filtros para análise frequencial, deixando apenas passar as frequências da banda que lhes corresponde (normalmente para estes efeitos trabalha-

se com bandas de oitava). Habitualmente, quer na fase de desenho quer na de diagnóstico acústico de recintos para manifestações musicais, as medições são normalmente feitas entre as bandas de frequência central de 125 Hz e 4000 Hz, podendo, conforme o interesse, esta faixa ser reduzida e conter apenas bandas de frequência baixa, média ou alta (Carrión Isbert, 1998; Mateus, 2008).

#### 4.2.7. Ruído de fundo em recintos- Curvas NC

Depois de analisado o ruído por bandas de oitava, há que perscrutar os seus efeitos.

O nível de ruído de fundo<sup>13</sup> aceitável de um recinto tem de estar abaixo da curva NC (Noise Criteria)<sup>14</sup> que lhe é recomendada em função da atividade à qual é destinado (fig.4.16). Dada a sensibilidade da atividade musical, às salas de concerto, a seguir aos estúdios de gravação, é atribuída a mais baixa curva NC (tab. 4.1) (Carrión Isbert, 1998).

Tab.4.1 – Curvas NC recomendadas para diversos recintos conforme as atividades a neles ser realizada (Carrión Isbert, 1998)

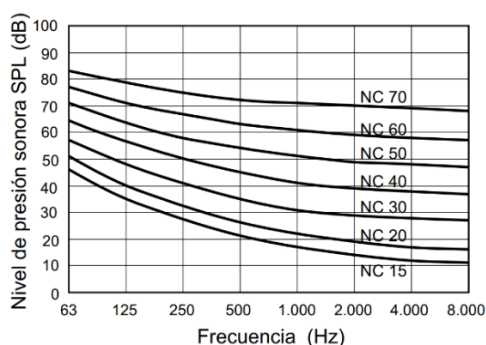


Fig. 4.16 – Curvas “Noise Criteria” (Carrión Isbert, 1998)

TIPOS DE RECINTOS	CURVA NC RECOMENDADA	EQUIVALENCIA EN dBA
Estudios de grabación	15	28
Salas de conciertos y teatros	15-25	28-38
Hoteles (habitaciones individuales)	20-30	33-42
Salas de conferencias / Aulas	20-30	33-42
Despachos de oficinas / Bibliotecas	30-35	42-46
Hoteles (vestibulos y pasillos)	35-40	46-50
Restaurantes	35-40	46-50
Salas de ordenadores	35-45	46-55
Cafeterías	40-45	50-55
Polideportivos	40-50	50-60
Talleres (maquinaria ligera)	45-55	55-65
Talleres (maquinaria pesada)	50-65	60-75

Para além do “Noise Criteria”, há outros modelos de comparação do ruído de fundo medido com o nível de ruído máximo aceitável, como por exemplo as curvas PNC (“Preferred Noise Criteria”), as curvas NR (“Noise Rating”), a curva NCA e outras<sup>15</sup> (Carrión Isbert, 1998).

<sup>13</sup> Medido em cada banda de oitava entre as oitavas de frequência central de 63 Hz e 8 kHz. É também possível comparar o ruído de fundo com as curvas NC mesmo sem que a análise do ruído tenha sido feita por bandas de oitava, mas não é o ideal. Nesses casos, a partir da curva NC 35, as curvas correspondem a um nível de pressão sonora LAeq 10 dB maior

<sup>14</sup> As curvas NC são também curvas isofónicas ou seja, acompanham de modo aproximado a evolução da sensação sonora do ouvido

<sup>15</sup> Apesar da variedade de modelos, na legislação portuguesa usa-se apenas dB (A).

### 4.3. Fonte sonora

#### 4.3.1. Tipos de fonte ideal

O comportamento da fonte sonora varia de caso para caso. Por exemplo, os instrumentos de uma orquestra não se comportam semelhantemente na forma de projetar o som, pelo que, para se obter uma ideia mais caracterizadora do campo sonoro real originado pelo conjunto, ter-se-ia de se analisar naipes por naipes<sup>16</sup>. Assim, tem-se que as características do campo sonoro originado dependem das características da própria fonte, que é única. No entanto, podem descrever-se todos os tipos de fonte como uma combinação de três tipos ideais, cujos campos sonoros originados podem caracterizar-se pelas (simples) formas das ondas (Mateus, 2008).

São elas:

- A fonte esférica ou pontual, que projeta a onda sonora radialmente, em esferas (figs. 4.17 e 4.18). Consequentemente, à medida que a distância à fonte aumenta, a energia sonora diminui numa razão de 6 dB por distância duplicada (Mateus, 2008)
- A fonte linear ou cilíndrica, que projeta o som segundo circunferências perpendiculares ao plano da fonte (fig. 4.19). Quando a distância dobra, o nível sonoro decai 3 dB (Mateus, 2008)
- A fonte plana, cuja frente de onda não varia em área com a distância, mantendo-se assim o nível sonoro independente constante (Mateus, 2008)

As fontes que serão abordadas durante o trabalho, tais como instrumentos musicais, serão consideradas esféricas, originando ondas esféricas.



Fig. 4.17 –Fonte Esférica Omnidirecional (Brandão,2018)

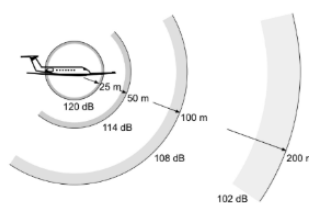


Fig. 4.18 –Exemplo de fonte esférica (Carrión Isbert, 1998)

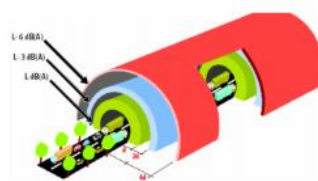


Fig. 4.19 –Exemplo de fonte cilíndrica (Mateus, 2008)

Como foi referido, a energia sonora direta diminui com a distância à fonte. No entanto, outros fatores contribuem para a atenuação sonora, como a absorção atmosférica, a velocidade do vento (sobretudo

<sup>16</sup> E, ainda assim, o mesmo instrumento projeta o som de forma diferente em função da frequência e do nível sonoro (diretividade, ver ponto 4.3.2)

em espaços abertos e em posições afastadas da fonte), os gradientes de temperatura (fig. 4.20), obstáculos, e as características absorventes dos materiais da envolvente (Carrión Isbert, 1998; Mateus, 2008).

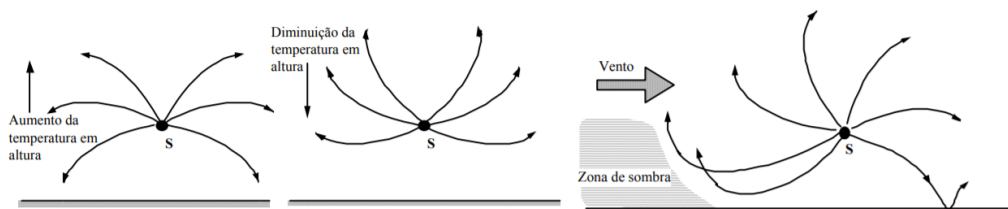


Fig. 4.20—Influência do gradiente de temperatura (à esquerda) e do vento (à direita) na propagação sonora (Mateus, 2008)

### 4.3.2. Diretividade da fonte sonora

Diz-se que uma fonte é diretiva quando radia com mais potência para determinada direção do que para as outras. Quase todas as fontes são diretivas. Para uma fonte ser omnidirecional, as suas dimensões têm de ser pequenas em relação ao comprimento da onda e o recetor tem de estar afastado da fonte. Se uma destas condições não for cumprida, torna-se evidente a diretividade da fonte.

A diretividade é função das características físicas da fonte, bem como da frequência e do nível de pressão sonora, aumentando com os mesmos.

Expressa-se pelo fator de diretividade  $Q$ , que relaciona o nível de pressão sonora a certa distância da fonte, e na direção considerada, com o nível de pressão que se obteria à mesma distância, mas se a fonte fosse omnidirecional<sup>17</sup>. Daqui se conclui que para uma fonte omnidirecional,  $Q=1$ , e quanto maior for a diretividade de uma fonte, maior o seu fator  $Q$  (Davis e Masten, 2016; Carrión Isbert, 1998).

## 4.4. Comportamento do campo sonoro

### 4.4.1. O som no espaço

O ambiente acústico pode ser caracterizado em função dos campos de som direto e refletido. O som direto chega ao ouvinte diretamente da fonte e é o primeiro som a chegar, já o som

<sup>17</sup> Nível de pressão sonora produzida por uma fonte diretiva, emitindo potência sonora  $W$ , numa direção e num espaço anecoico menos o nível de pressão sonora produzida por uma fonte pontual, emitindo potência sonora  $W$ , numa direção definida à mesma distância

refletido chega indiretamente ao ouvinte e mais tarde. Destacam- se já no âmbito do som refletido as primeiras reflexões<sup>18</sup>, compreendidas nos primeiros 80ms (em contexto musical) após a chegada do som direto, e a cauda reverberante (Beranek, 2004; Carrión Isbert, 1998; Mateus, 2008).

Neste contexto, torna- se ainda conveniente a referência a um outro fenómeno, a difração, que acontece quando a onda sonora encontra um obstáculo pequeno em comparação com o seu comprimento de onda. A onda contorna o obstáculo continuando a propagar- se a partir das linhas limite do obstáculo, que funcionarão como fontes sonoras (Ribeiro, 2002).

#### **4.4.1.1. Som direto**

O som direto é o mais fácil de caracterizar. Assumindo a fonte pontual, o nível de pressão sonora, também designado nível de campo direto (por estar na zona de campo direto), é tanto maior quanto mais próximo se estiver da fonte, decaindo 6dB cada vez que a distância à fonte dobrar (Prata- Shimoura et al., 2004).

#### **a) Efeito Doppler**

O efeito doppler ocorre quando a fonte se movimenta em relação ao recetor. Se a fonte se aproximar do recetor a frequência vai parecer mais alta. Por exemplo, se ambos, a fonte e o recetor, estiverem parados um em relação ao outro, e a fonte emitir uma frequência de 400 Hz, o recetor vai perceber 400 Hz, mas, se a fonte se mover em direção ao recetor, este vai perceber uma frequência mais alta, pois, uma vez que o som mantenha a sua velocidade, a taxa de vibração da onda por cada segundo é maior ao penetrar nos tecidos auditivos. Ao contrário, se a fonte se afastar, vai ser percebida uma frequência mais baixa. A variação da frequência sentida (em relação à frequência se a fonte e o recetor estiverem parados) depende da velocidade a que

---

<sup>18</sup>O termo físico “reflexão” remete para um fenómeno em que uma onda sonora ou luminosa incide numa superfície lisa e polida e é refletida no mesmo ângulo da incidência. Todas as superfícies que refletem luz, como espelhos, também refletem som, mas nem todas as superfícies que refletem som refletem luz. Na realidade, todas as superfícies, até as mais polidas, têm pequenas granulometrias que difundem o som, ou seja, que o dispersam em mais do que uma direção (múltiplas reflexões), mas, uma vez que a ordem de grandeza dessas deformações seja muito baixa em comparação com o comprimento da onda incidente, a difusão é impercetível, pois a maior parte da energia dirige- se numa única direção, com um ângulo muito aproximado ao da incidência, e o que é perceptível é uma única onda forte vinda de tal direção. Este fenómeno também é designado por reflexão especular.

No entanto, neste trabalho, para que a linguagem se torne mais abrangente, o termo reflexão será utilizado para descrever o direcionamento sonoro por parte da envolvente de um recinto, independentemente de esse direcionamento acontecer na forma de reflexões especulares ou na forma de múltiplas reflexões originadas por elementos difusores. Esta abrangência de fenómenos por parte de uma mesma designação torna- se adequada num contexto em que seja necessário falar de um campo de som refletido que pode ser constituído simultaneamente por campos sonoros provenientes do fenómeno de difusão e campos provenientes de reflexões especulares. Não obstante, cada vez que for conveniente a referência ou o destaque a um desses fenómenos de forma isolada, o termo reflexão especular será utilizado para designar o fenómeno físico da reflexão, e o termo difusão será utilizado para designar o fenómeno da dispersão na forma de múltiplas reflexões.

a fonte se movimenta em relação ao recetor, aumentando com a mesma. É precisamente o que acontece quando um carro passa por uma pessoa. À medida que ele se aproxima, a altura do som sobe, e quando se afasta, desce.

A título de curiosidade, o efeito doopler aplicado às ondas luminosas permite aos cientistas calcular distâncias interestelares através da cor percebida da luz das estrelas e das galáxias, sendo que esse fenómeno lhes permitiu inferir que o universo está a expandir-se, uma vez que se verifica um desvio da cor (percetida) das galáxias para o vermelho (associado a menor frequência) (Dottori, 2014; Ribeiro, 2002; UFRGS TV, 2014)

#### **4.4.1.2. Som refletido**

O estudo do som refletido é particularmente importante em recintos para a música, sobretudo quando estes são enclausurados. As reflexões permitem o reforço sonoro, mantendo a energia no espaço por mais tempo<sup>19</sup>. Para além disso, a sua direção, atraso, ordem<sup>20</sup> e intensidade são fatores determinantes para a satisfação de quase todos os parâmetros acústicos (Long, 2006).

Considera-se que em salas de concerto a primeira reflexão não deve ultrapassar os 25 ms após a chegada do som direto<sup>21</sup>, e que a energia das reflexões seguintes deve ir decaindo gradualmente (à medida que o número, bem como a ordem, aumenta) até aos 80ms, a partir dos quais a energia já é bastante mais fraca, não contribuindo para a clareza, mas para a sensação de enchimento sonoro (Beranek, 2004).

O ecograma ou reflectograma, ou ainda gráfico de resposta da sala, relaciona a evolução temporal das reflexões com o nível sonoro associado. Destacam-se o som direto, as primeiras reflexões e as reflexões tardias ou cauda reverberante (fig. 4.21) (Carrión Isbert, 1998; Brandão, 2018).

Depois das salas serem construídas, normalmente verifica-se a sua resposta acústica através desses gráficos, obtidos por meio do registo da evolução temporal da energia sonora proveniente, por exemplo, de um disparo, o qual tem a vantagem de, para além de ser intenso e de curta duração (som impulsivo), ter uma rica distribuição espectral, o que permite verificar por uma única vez como a sala reage num largo domínio frequencial. Não obstante, também em

---

<sup>19</sup> O que significa que o RT aumenta

<sup>20</sup> A ordem de uma reflexão remete para a quantidade de incidências nas superfícies da sala antes de a energia chegar ao recetor

<sup>21</sup> Como se verá no capítulo seguinte, a distância temporal entre a chegada do som direto e a da primeira reflexão é caracterizada pelo parâmetro ITDG

fase de projeto é possível obter este tipo de diagramas, mas desta vez, através de simulações em software que permitem prever a qualidade acústica da sala (Carrión Isbert, 1998).

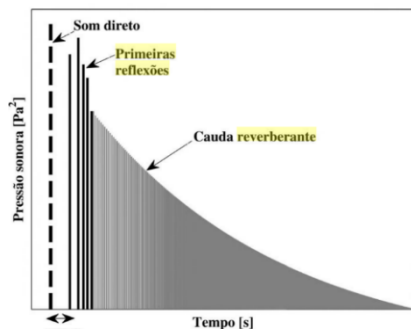


Fig. 4.21 – Ecograma (Brandão, 2018)

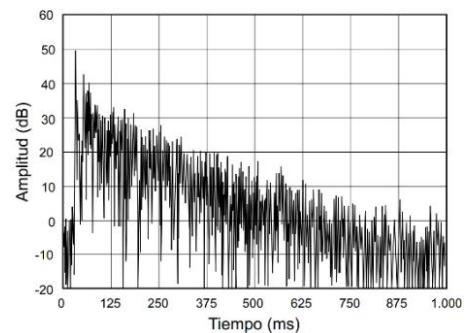


Fig. 4.22 – Exemplo de curva ETC num ponto de um recinto (Carrión Isbert, 1998)

Atualmente há programas informáticos que se baseiam em TDS (“Time Delay Spectrometry”) ou MLS (“Maximum Length Sequence”), que fornecem a curva de decaimento energético ou curva energia tempo ETC (*Early Time Decay*) para cada ponto do recinto (fig.4.22) (Isbert, 1998).

Por curiosidade, a reflexão do som é um fenómeno do qual muitos seres vivos se aproveitam para localizar objetos, por meio de uma habilidade conhecida como ecolocalização. São exemplos desta adaptação biológica os morcegos e os golfinhos, que, precisando de caçar e de se mover em ambientes muito escuros, “vêm” através da audição. Eles emitem sons de altas frequências que lhes são refletidos e que eles percebem através de um sonar biológico que lhes permite localizar, com base no atraso e sentido da reflexão, obstáculos ou presas. Os morcegos conseguem mesmo detectar fios de meio milímetro de espessura, e os golfinhos, pequenos peixes a 200m de distância (o que, tendo em conta que a velocidade do som na água é maior que no ar, se torna surpreendente, pois a precisão também tem de ser maior) (Santoro, 2002).

Ao que parece, a habilidade do Homem em se adaptar ao mundo por meio das suas necessidades, também lhe permite desenvolver este tipo de estratégias. Algumas pessoas cegas desenvolveram pequenos sonares, como Lucas Murray que, emitindo pequenos estalidos com a boca, para além de localizar objetos, percebe a sua geometria e materialidade<sup>22</sup> (UFRGS TV, 2014).

<sup>22</sup> A percepção da própria materialidade pode-se explicar pela diferença do nível sonoro da energia emitida em comparação com o nível da energia recebida, tendo em conta que diferentes materiais têm diferentes índices de absorção. Ao mesmo tempo, a geometria pode ser percebida pela uma expedita capacidade perceber o sentido do retorno sonoro.

### a) Zonas das primeiras reflexões

As primeiras reflexões são muito importantes na percepção espacial. Baranek (2004) relacionou-as com o conceito “intimidade”. São descritas como as reflexões até aos primeiros 100 ms após a fonte ter interrompido a emissão. Dentro das primeiras reflexões podem-se distinguir duas zonas temporais: até aos primeiros 50ms após o som direto (referência em contexto de auditórios para palestras ou conferências, os quais devem promover a inteligibilidade da conversa) ou 80 ms (referência no âmbito das salas de concerto, por exemplo, em que deve haver clareza musical em articulação com um preenchimento sonoro ou reverberação entre as notas), e dos 50 ou 80 ms para a frente.

Dentro da primeira zona as reflexões são percebidas como se estivessem integradas no som direto, contribuindo para a inteligibilidade (no caso da palavra) ou clareza (o equivalente à inteligibilidade, mas no caso da música). A partir desses limites temporais (sensivelmente), a cauda reverberante deve ser consideravelmente mais fraca em termos energéticos, pois caso contrário será motivo de desconforto na plateia e, em casos extremos, no próprio palco. A partir dos 100 ms, se a energia ainda for grande, os ecos tornam-se evidentes. Em salas de superfícies muito lisas e paralelas podem até acontecer ecos flutuantes (repetição múltipla do som quando a fonte sonora emite entre duas paredes paralelas lisas e muito refletoras) (figs.4.23 e 4.24) (Carrión Isbert, 1998).

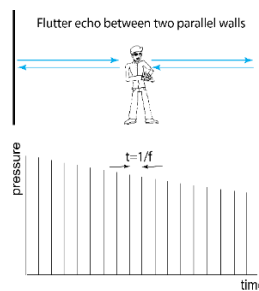


Fig. 4.23 - Eco flutuante (Cox, 2014)

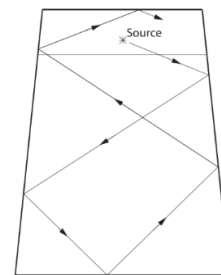


Fig. 4.24 - Múltiplas reflexões (Barron, 2009)

Os gráficos da figura 4.25 demonstram o que acontece relativamente à percepção sonora, no caso da palavra, até aos primeiros 50 ms, e depois.

As primeiras reflexões contribuem ainda para a percepção de onde vem o som, permitindo ao ouvinte localizar os diversos instrumentos, ter a noção do seu tamanho, etc... (Baranek, 2004; Brandão, 2018; Carrión Isbert, 1998).

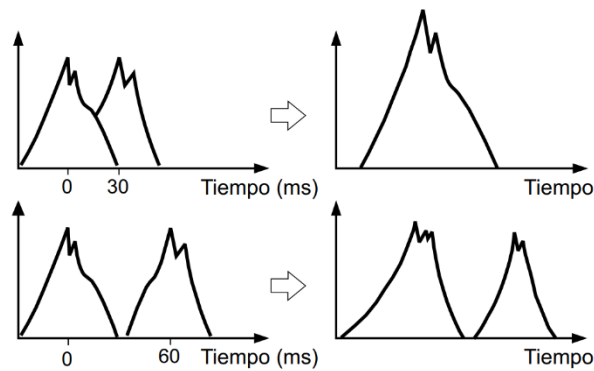


Fig. 4.25 – Representação do efeito real sonoro (à esquerda) e da percepção sonora associada (à direita) (Carrión Isbert, 1998)

### **b) Reverberação**

As reflexões tardias promovem o preenchimento sonoro e são responsáveis pela sensação de reverberação. A reverberação é a permanência do som depois de a fonte ter interrompido a emissão e, como tal, é um parâmetro que pode ser medido através da emissão de um som breve e forte como um disparo, ou da emissão de bandas de frequência<sup>23</sup>. Por sua vez, o tempo de reverberação é o tempo durante o qual o som permanece até o seu nível ter decaído 60 dB (fig.4.26). Esse tempo depende das características de absorção da sala. Quanto mais absorvente, menor será o tempo de reverberação e vice-versa (Barron, 2009; Beranek, 2004; Carrión Isbert, 1998).

A reverberação também varia com a frequência, sendo que, em salas de concerto, as frequências mais altas geralmente têm menores tempos de reverberação, pois os revestimentos que normalmente são aplicados, bem como a plateia, absorvem melhor as altas frequências (ver secção 6.5.1) (Carrión Isbert, 1998).

<sup>23</sup> Neste caso, o tempo de reverberação é a média aritmética das bandas. As bandas recomendadas para o efeito constituem a faixa entre as bandas de frequência central de 500 Hz e 1 kHz

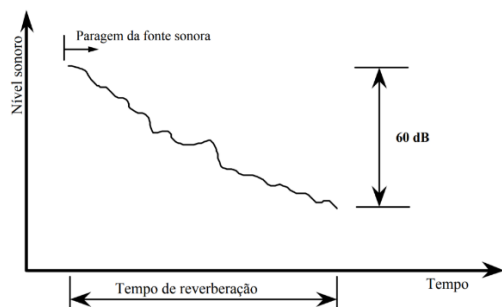


Fig. 4.26 – Tempo de reverberação (Mateus, 2008)

Tab. 4.2 – Tempos de reverberação recomendados para diversos recintos, de acordo com a atividade à qual são destinados (Carrión Isbert, 1998)

TIPO DE SALA	RT <sub>mid</sub> , SALA OCUPADA (EN s)
Sala de conferencias	0,7 – 1,0
Cine	1,0 – 1,2
Sala polivalente	1,2 – 1,5
Teatro de ópera	1,2 – 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 – 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,8 – 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 – 3,0
Locutorio de radio	0,2 – 0,4

Há recomendações para os tempos de reverberação, mediante a atividade a decorrer no espaço em questão. Tempos de reverberação altos caracterizam um espaço “vivo”, o que é ótimo, se não for exagerado,

para concertos sinfónicos da época romântica, por exemplo. Por outro lado, no caso da música contrapontística de Bach, um espaço de “vivacidade” romântica pode reduzir a clareza musical deste género do Barroco, o qual necessita de um ambiente acústico um pouco mais “seco” (Beranek, 2004). Em Carrión Isbert (1998) é apresentada uma tabela com recomendações de tempos de reverberação em conformidade com a atividade para a qual o espaço se destina (tab. 4.2).

Beranek (2004) descreve como as orquestras desenvolvem técnicas que se lhes tornam carismáticas para se adaptarem à acústica das suas salas, e como, por vezes, têm de enfrentar a necessidade de ajustar o ataque quando têm de tocar em salas muito diferentes da sua.

Nota: é importante entender que a cauda reverberante tem tanto a ver com a reverberação e com o tempo de reverberação quanto o som direto e as primeiras reflexões. Como já foi referido, a reverberação é o grau de permanência da energia sonora desde que a fonte é interrompida até que o nível de pressão sonora reduz 60 dB. Essa energia inclui o som direto, primeiras e últimas reflexões. A cauda reverberante apenas é assim designada porque é o último som a ser recebido, associado a uma ordem alta, e, portanto, com energia já baixa, constituindo uma “prolongação” ou um “sustain” do som, providenciando um certo enchimento sonoro.

#### 4.4.1.3. Resposta da sala à emissão contínua

Os ecogramas ou curvas ETC mostram a evolução energética de um som breve, que caracteriza a resposta da sala ao impulso.

Numa sala com uma fonte a emitir de forma contínua, a energia sonora total, caracterizada pelo som direto e pelo som refletido, aumenta até um ponto de equilíbrio, pois, passado um certo tempo a partir do momento em que a fonte começa a emitir, a energia sonora emitida iguala-se à energia sonora absorvida quando a onda incide nas superfícies que delimitam o espaço. Do mesmo modo, quando a fonte interrompe bruscamente a emissão sonora, a energia diminui progressivamente, o que é como dizer que o nível de pressão sonora diminui até “desaparecer” (figs. 4.27 e 4.28) (Carrión Isbert, 1998).

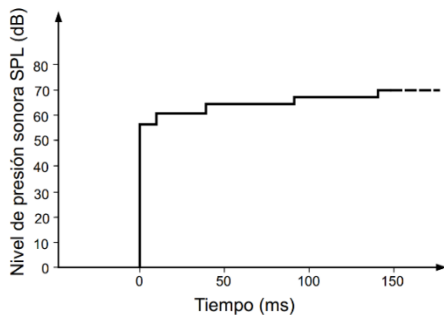


Fig. 4.27 –Aumento progressivo do SPL num ponto de um recinto após uma fonte começar a emitir energia de forma contínua (Carrión Isbert, 1998)

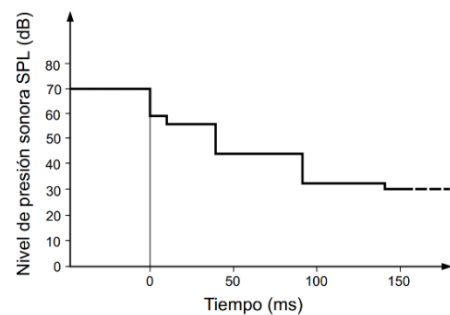


Fig. 4.28 –Diminuição progressiva do SPL num ponto de um recinto após uma fonte interromper a emissão de energia sonora (Carrión Isbert, 1998)

#### 4.4.1.4. Nível sonoro total: modelo tradicional vs modelo revisto

A teoria tradicional assume que o nível sonoro global é função dos níveis do som direto e refletido, sendo que o primeiro varia com a distância e o segundo se mantém constante.

Assim, o nível sonoro global de um recinto, depois de uma fonte estar a emitir continuamente, resulta da soma dos níveis de campo direto e reverberante. Ao primeiro associa-se a zona em que predomina o som direto, e ao segundo, a zona do campo reverberante.

À distância em que os níveis dos dois campos se igualam chama-se distância crítica.

Quando a distância crítica é elevada, então o nível de campo reverberante é baixo, e a sala é mais “seca” (fig. 4.29) (Carrión Isbert, 1998).

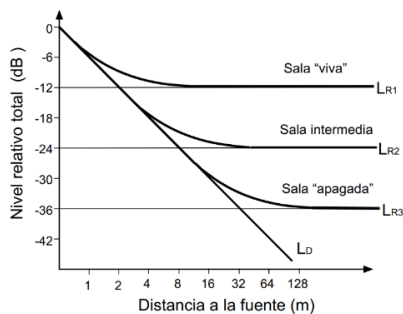


Fig. 4.29 – Relação entre o nível total de pressão sonora e a sensação subjetiva (Mateus, 2008)  $L_D$  é o campo direto e  $L_R$  é o campo reverberante (Carrión Isbert, 1998)

A Teoria Revista não despreza a alteração do nível do campo refletido ao longo da sala. Pelo contrário, admite que o nível sonoro de ambos os campos (direto e refletido) diminui com a distância. Desse modo, as partes em que o campo sonoro é dividido consistem uma zona caracterizada pelo som direto e primeiras reflexões, e outra caracterizada pelo som reverberante, sendo que, embora ambas variem em nível sonoro, a primeira diminui mais rápido devido à inclusão do som direto que decresce 6 dB à medida que a distância à fonte (pontual) duplica. A figura 4.30 ilustra o comportamento do campo sonoro numa sala em termos do nível sonoro global. Numa sala real, para além da influência das suas distintas características arquitetónicas (em relação à sala representativa), espera-se que junto das superfícies refletoras os níveis sonoros sejam mais altos (Barron, 2009).

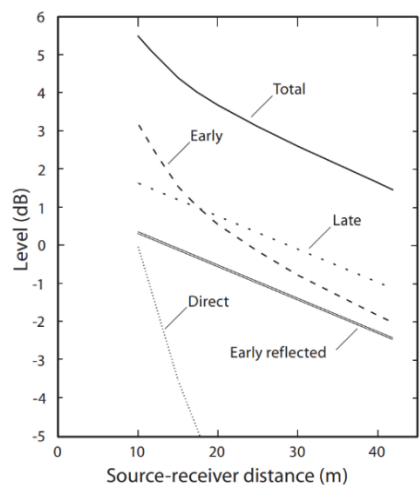


Fig. 4.30 – Comportamento do campo sonoro de acordo com o modelo utilizado na teoria revista numa sala representativa de 20 000 m<sup>3</sup> e 2 s de RT (assume-se como referência que a 10 m da fonte o nível do som direto corresponde a 0 dB) (Barron, 2009)

#### **4.4.2. Modelos de caracterização acústica**

O comportamento sonoro em cada recinto para a música, sobretudo em recintos fechados depende, portanto, do campo direto e do campo refletido (incluindo primeiras e últimas reflexões), e ainda das características de ressonância da sala que se manifestam na coloração<sup>24</sup> (apesar dessas características não serem tão perceptíveis em recintos de grandes dimensões, como são aqueles do escopo deste trabalho, quanto nas salas mais pequenas). Seguindo esta premissa, nomeiam-se três métodos para, em fase de desenho, prever e simular o comportamento dos campos sonoros num recinto fechado. Os métodos são utilizados de acordo com o que se pretende avaliar (como o encaminhamento das reflexões, tempo de reverberação, modos próprios da sala, etc...) e com o tipo de recinto. São eles a Acústica geométrica, útil para a compreensão do campo sonoro em função da geometria, dimensões e organização espacial, a Acústica Estatística, aplicada na previsão de tempos de reverberação e balanços energéticos, tendo em conta as dimensões do espaço e a materialidade da envoltória, e a Acústica Ondulatória para a previsão, entre outras coisas, dos modos próprios da sala, conforme a geometria da mesma e os sistemas de acabamento (por exemplo, se houver cavidades de Helmholtz poderá haver absorção de certas frequências por ressonância, bem como se se optar por acabamentos em painéis de madeira, etc...) (Brandão, 2018; Carrión Isbert, 1998; Mateus, 2008; Rathnayake & Wanniarachchi, 2019).

##### **4.4.2.1. Acústica Geométrica**

A adaptação geométrica de uma sala a um campo sonoro que responda com requinte à ação dos músicos pode e deve ser determinada ainda em fase de desenho. Uma ferramenta útil para tal é a técnica da Acústica Geométrica. No primeiro capítulo (introdução) foi referido que, no século XIX, Reynolds e Rayleigh demonstraram que os fenómenos associados às ondas sonoras podem ser representados e explicados através de raios ópticos como se de luz se tratasse. É precisamente nessa analogia que esta disciplina consiste. Sabe-se que obedecendo à lei da reflexão dos raios de luz, o som, quando bate numa superfície lisa reflectante, é refletido no mesmo ângulo (fig. 4.31).

---

<sup>24</sup> Coloração resulta da intensificação de algumas frequências, as frequências de ressonância, ou, ainda, frequências de reflexões especulares, podendo, em casos extremos, ser sinónimo de um desequilíbrio na peça musical que chega à plateia

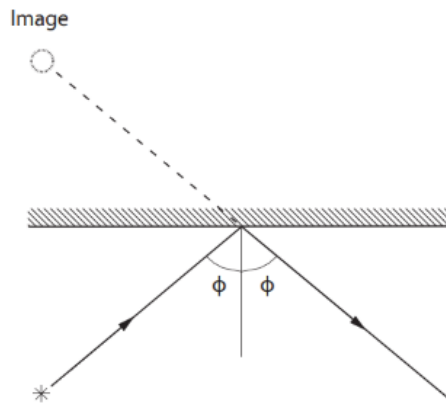


Fig. 4.31–Reflexão especular (Barron p.15, 2009)

Deste modo, os modelos deste método ignoram a possível ocorrência de fenômenos de difração, difusão e absorção, assumindo sempre as superfícies como tendo dimensões grandes em relação ao comprimento de onda, e como sendo lisas e refletoras. Todavia, a técnica da acústica geométrica não deve ser desconsiderada, ao que, pelo contrário, é suficiente e extremamente útil para muitas das considerações a ter na fase de desenho, como a forma, as dimensões e a disposição da plateia no piso principal, a localização de varandas, camarotes e palco (Carrión Isbert, 1998; Mateus, 2008).

De entre os métodos geométricos para análise da viabilidade de um espaço tendo em vista um campo sonoro otimizado, destacam-se dois, o traçado de raios (“ray tracing”) e o “Image-Source Method” (ISM). Entre eles, o segundo provou a sua vantagem através da eficiência em indicar os vários caminhos possíveis das reflexões até à ordem desejada ou durante um certo período de tempo, bem como os níveis de pressão sonora em diversos lugares (os softwares de simulação ISM fornecem ecogramas ou gráficos de resposta ao impulso que, embora os níveis sonoros neles indicados não tenham em conta as características de absorção e difusão da envolvente, permitem antever a homogeneidade ou heterogeneidade do nível sonoro ao longo da sala), o que permite ter uma ideia geral, em fase de desenho, se o tempo de reverberação desejado é possível na arquitetura que está a ser desenvolvida, e se esta propicia um campo sonoro equilibrado em toda a sala, sem deixar lugares em que, por exemplo, as reflexões sejam demasiado fracas (Rathnayake & Wanniarachchi, 2019).

Os programas informáticos ISM estão a ser desenvolvidos para fazer simulações em 3D, no entanto, as previsões em 2D sempre se mostraram úteis e com inúmeras aplicações na acústica

arquitetónica, incluindo auralização binaural e previsão do comportamento sonoro e controlo de ruído em espaços fechados, e mesmo noutras áreas, como na optimização de jogos de realidade virtual, etc...(Rathnayake & Wanniarachchi, 2019).

As previsões em 2D tornam-se uma ferramenta fácil de utilizar em desenho (mesmo na ausência de simulação digital). Uma vez que o projetista tenha sensibilidade musical e integre o conhecimento dos parâmetros subjetivos, pode utilizar-se desse modelo até como guia criativo, de modo que, desde o início, o desenho integre a acústica como uma característica da arquitetura, e para bem dizer, das mais importantes no caso das salas de concerto (Rathnayake & Wanniarachchi, 2019).

Como já foi referido, este método consiste em encontrar todos os caminhos possíveis das reflexões. Isso é feito com base em imagens espelhadas da fonte, em que os eixos de simetria são as superfícies limite do palco (figs. 4.32 e 4.33) (Rathnayake & Wanniarachchi, 2019).

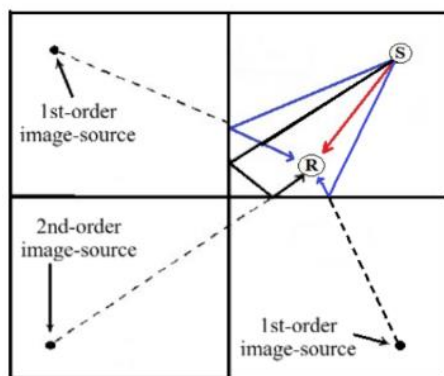


Fig. 4.32- *Image Source Method*, aplicação até à segunda ordem (Rathnayake & Wanniarachchi, 2019)

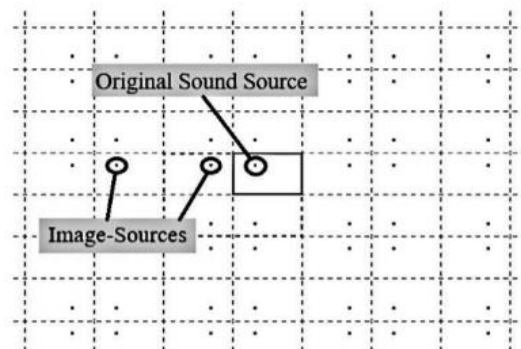


Fig. 4.33- *Image Source Method*, aplicação até à ordem n (Rathnayake & Wanniarachchi, 2019)

Essas imagens correspondem às reflexões de primeira ordem, ao que também são designadas imagens de primeira ordem. Quando as imagens de primeira ordem são também elas espelhadas, dão origem às imagens de segunda ordem e assim por diante até à ordem desejada ou até se completar o período de tempo em estudo.

#### 4.4.2.2. Acústica Estatística

A acústica estatística permite prever o balanço energético na sala através de modelos estatísticos, como a famosa equação do RT de Sabine e tantas outras.

#### 4.4.2.3. Acústica Ondulatória: modos próprios

Quando um sistema tem a mesma frequência própria das ondas que sobre ele incidem, entra em vibração por simpatia. A isto se chama ressonância. Formam-se ondas estacionárias associadas a certas frequências, as quais constituem os modos próprios da sala. Estes variam conforme as proporções e geometria do recinto e as ligações entre os elementos arquitetónicos, e são ilimitados, embora a sua densidade aumente com a frequência. Cada solução geométrica tem associado um conjunto de modos próprios. Esse conjunto providencia uma coloração ao ambiente acústico. Convém que os modos próprios tenham uma disposição (relativamente) uniforme no espectro, caso contrário, surgem concentrações em bandas estreitas de frequência que intensificam o efeito da coloração, o que não é desejado. As proporções arquitetónicas de um espaço devem, então, ser afinadas para otimizar o ambiente acústico de uma sala. A figura 4.34 mostra duas salas e os modos próprios associados (Carrión Isbert, 1998; Michels, 2003).

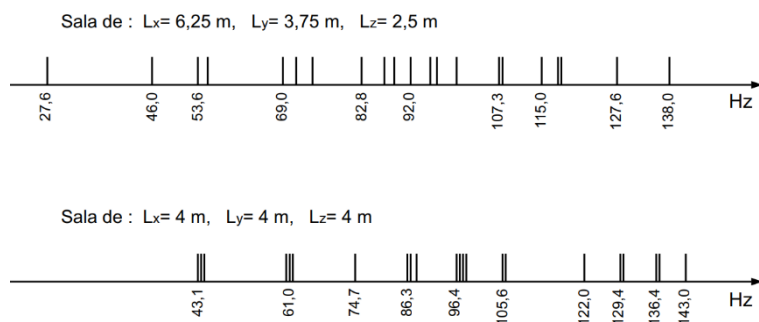


Fig. 4.34 –Relação entre as proporções arquitetónicas de um recinto e os modos próprios associados (Carrión Isbert, 1998)

O estudo analítico dos modos próprios pode ser realizado com base na Acústica Ondulatória. Para salas paralelepípedicas e de superfícies muito lisas, equações simples como a de Helmholtz ou a de Rayleigh permitem calcular as frequências próprias, mas para salas não paralelepípedicas é necessária a aplicação de métodos de cálculo mais complexos como o método de elementos finitos ou de elementos de fronteira (Carrión Isbert, 1998; Mateus, 2008).

## 5. PARÂMETROS SUBJETIVOS E OBJETIVOS DA EXPERIÊNCIA MUSICAL

*Theatre design is based on hard facts and is rarely a matter of inventing new forms of theatre. The architect works within a large number of constraints, some of which are self-imposed, and if inventiveness comes into it at all, it is in the way that theory is put into practice*

Peter Moro (1982, citado por Barron, 2009 p. 1)

### 5.1. Os ensaios

A distância abismal entre a objetividade acústica e a arquitetura tem vindo a ser reduzida desde que Sabine conduziu à luz do emergente século XX um atributo mesurável a partir do qual se tornou possível fazer previsões sobre a qualidade acústica de uma sala de concertos, ainda durante a fase de projeto. Mas logo se percebeu que o sucesso acústico não se deve apenas ao tempo de reverberação, sendo que em salas de concerto com geometrias e dimensões que fugissem da filosofia<sup>25</sup> construtiva das salas clássicas<sup>26</sup>, os resultados acústicos não eram tão prezados. O Royal Festival Hall em Londres, de 1951, foi construído no contexto da reconstrução Britânica das salas de concerto, após o bombardeamento da segunda guerra mundial. As novas salas preparavam-se para audiências maiores, tendo de assumir novas organizações espaciais, e consequentemente formais, ao que se tornava emergente o desenvolvimento de conhecimento prático que conduzisse o desenho e permitisse inferir sobre a qualidade acústica consequente. Na mesma década, novos estudos tomaram como foco o processamento da informação musical pelo ouvido, o que deu início aos experimentos subjetivos (Barron, 2009). Lacatis et al. (2008) refere quatro escolas de investigadores, em Dresen, com Reithardt, Schmidt, Shlutz, Cremer e Curer, em Berlin, com Lehman e Wilkers, em Goettingen, com Gottlob, Siebrasse, Eysholdt, e Schroeder, contando ainda com a escola Japonesa, com Hidaka, Maekawa, Morimoto e Okano. Não constando nestas listas, outros investigadores entre os quais Beranek, Barron, Marshall, Kahle, Gade, Haan, Fricke, Farina e Ando contribuíram com importantes pesquisas (Lacatis et al, 2008).

---

<sup>25</sup> O termo filosofia é aqui aplicado como metáfora para designar o ideal ou o estereótipo das salas de concerto

<sup>26</sup> O termo "clássicas" não é aqui integrado como uma definição do caráter estilístico da arquitetura, mas antes como uma definição de um modelo de salas que, devido ao "status" que na época e até ao dias de hoje atingiram em relação à beleza visual e acústica, se tornaram referência no âmbito da acústica arquitetónica

As pesquisas destes autores deram-se sobretudo por meio de questionários a músicos, maestros, críticos e engenheiros acústicos (para que a linguagem técnica a todos fosse comum), dos quais importantes relações arquitetônicas acústicas foram compreendidas. Nestes termos é de prezar o trabalho pioneiro de Leo Beranek que, inicialmente, em 1962, apresentava uma lista de oito atributos subjetivos aos quais atribuía diferentes relevâncias para a avaliação geral acústica (tab. A1 do anexo A) (Long, 2006). Mais tarde, em 1996, apoiando-se nos quatro parâmetros ortogonais (ou independentes) emergentes dos experimentos de Ando publicados em 1985, tais como envolvimento (expresso através do IAACCE3), reverberação (expressa através do EDT), sonoridade (expressa através do G), e clareza, publicou uma nova lista ponderada, acrescentando-lhe dois novos, o Calor (expresso através do Bass Ratio, BR), e a difusão (expressa através do Surface Diffusivity Index, SDI) (tab. A2 do anexo A). O primeiro livro de Beranek, publicado em 1962, foi por duas vezes revisto para novas publicações em 1996 e em 2004, sendo que foi apresentando uma visão evolutiva e mais abrangente em que a totalidade dos parâmetros propostos compreende o RT (tempo de reverberação ou de preenchimento sonoro), o EDT (tempo de decaimento inicial, correlacionado com a sensação de preenchimento sonoro sobretudo entre notas de sucessão rápida), definição ou clareza, o ITDG (atraso da primeira reflexão em relação ao som direto, correlacionado com a intimidade), o RT mid (vivacidade ou resposta reverberante nas faixas de frequência médias), BQI (percepção espacial ou sensação de espacialidade<sup>27</sup>), BR ou  $G_{125}$  (sensação de calor),  $IACC_{L3}$  (sensação de envolvimento),  $G_{mid}$  (força sonora ou sensação de volume sonoro)), ressonância, timbre e tom (Beranek, 2004; Lacatis et. al., 2008; Long, 2006).

Em Lacatis et. al. (2008) pode encontrar-se uma visão cronológica sobre o surgimento de vários parâmetros objetivos por parte de vários autores.

Desde os anos 50 até aos 80 também se realizaram muitos experimentos com recurso a cabeças de manequim com microfones nos canais auriculares (fig.5.1), as quais eram colocadas em determinada sala para gravar. Outros ensaios consistiam em simulações sonoras através do controlo dos campos direto, refletido e reverberante. Nestes casos o ficheiro sonoro era reproduzido em laboratório, normalmente numa sala anecoica, por meio de auscultadores ou através de três altifalantes simulando o som direto e as reflexões, sendo que a reverberação podia ser controlada por diferentes mecanismos como placas de reverberação ou reverberadores eletrónicos (fig. 5.2) (Barron, 2009, p. 41; Long, 2006, p. 668).

---

<sup>27</sup> O BQI é assinalado por Beranek como um melhor caracterizador do tamanho aparente da fonte (ASW) do que o LF (Barron, 2009; Beranek, 2004)



Fig. 5.1 – Cabeça de manequim com microfones nos canais auriculares (Barron, 2009)

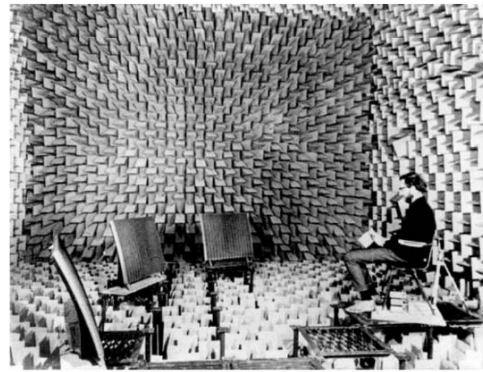


Fig. 5.2 – Simulação, numa sala anecoica, baseada na recreação do campo sonoro real de uma sala de concertos, através de altifalantes. Aquele diretamente à frente do ouvinte utiliza-se para o som direto, e os outros emitem sinais com um determinado atraso para simular as primeiras reflexões. A reverberação pode ser controlada, por exemplo, por placas de reverberação (Barron, 2009)

Modulando o campo sonoro era possível alterar as variáveis em estudo, o que permitia que as pessoas sujeitas ao experimento respondessem com mais facilidade sobre qual reprodução mais gostavam (Long, p. 668).

O experimento de Ando (1985, citado por Long, 2006; Barron, 2009) foi realizado nestes termos. Uma matriz esférica de altifalantes foi colocada a reproduzir música numa sala anecoica. As duas obras musicais foram “*Royal Pavanne*” de Gibbons e “*Sinfonietta, Opus 48*”, 3º movimento, de Malcom Arnold (Long, 2006).

### 5.1.1. Linearidade e não linearidade dos parâmetros

Todos estes testes levaram à conclusão de que, divergindo do que acontece na experiência sonora em discursos e conferências<sup>28</sup>, a experiência musical é multidimensional. Hawkes and Douglas (1971, citado por Barron, 2009) foram os primeiros a defender a existência de pelo menos cinco dimensões ortogonais, a resposta reverberante, a clareza, a espacialidade, a intimidade e a sonoridade. Sobre estes parâmetros muito estudo se tem vindo a desenvolver com vista a perceber a melhor maneira de os quantificar. Nesta linha, duas abordagens à

---

<sup>28</sup> Haas (1951, citado por Barron, 2006, p. 41) executou estudos sobre o ambiente acústico relativo a conferências ou outras atividades que tomam a compreensão da palavra como o parâmetro mais importante da experiência sonora, os quais contribuíram com informação relevante sobre a inteligibilidade

qualidade acústica das salas têm sido feitas. Uma que assume linearidade nos parâmetros, ou seja, que a soma dos parâmetros ponderados definiria a qualidade acústica total do espaço, usando de fórmulas tais como a que pode ser consultada no anexo B (eq. B1), e a outra, atualmente mais aceita, que assume a multidimensionalidade não linear, ou seja, as várias dimensões não se compensam, sendo que de outro modo, como Barron (2009, p.42) explica, um eco poderia ser compensado por boas condições de intimidade.

Resumindo, a teoria linear assume que a experiência musical se baseia na concentração psicológica num todo cuja dependência das partes acontece de modo semelhante em todas as pessoas, podendo assim ser traduzido num valor único, como demonstra a equação acima referenciada. Mas as evidências demonstram uma realidade mais complexa, em que, para duas pessoas diferentes, mesmo que o todo tenha o mesmo valor e as suas partes pesem igual, a percepção individual será diferente, porque a mente de uma pessoa depositará mais concentração em certos atributos, e a mente da outra, noutros<sup>29</sup>.

### **5.1.2. Ortogonalidade**

Entre os diversos autores há alguma discrepância entre a atribuição de parâmetros objetivos aos atributos subjetivos, sendo que, conseqüentemente, os mesmos atributos, mediante a visão de cada autor, podem ser ortogonais ou interdependentes, conforme as variáveis do campo sonoro que cada parâmetro objetivo por eles (autores) atribuído utiliza para os descrever. Por exemplo, segundo Beranek (1962, citado por Long, 2006; Barron, 2009) e Beranek (2004) o ITDG é o parâmetro objetivo que mais se relaciona com a sensação de intimidade, sendo que, na investigação de Barron (1988, citado por Barron 2009), a força sonora (G) parece correlacionar-se melhor. Nesse caso, na concepção de Barron, intimidade e sensação de volume sonoro não são parâmetros ortogonais, porque ambos assentam na mesma variável (nível sonoro), enquanto que, na concepção de Beranek, cada um destes atributos é quantificado a partir de variáveis diferentes das do outro (as equações de diversos parâmetros objetivos, segundo a concepção de Beranek, podem ser consultadas no anexo C, eqs. C1 - C6).

Beranek (2004, p. 529) apresenta uma tabela (tab. 5.1) na qual estabelece as relações de interdependência ou independência entre diversos parâmetros objetivos (alguns dos quais

---

<sup>29</sup> A avaliação subjetiva da experiência musical reflete que a dependência do todo em relação às partes difere de pessoa para pessoa

ainda não foram referidos), observadas em 42 salas de concerto. Uma correlação maior que 0.6 indica que os mesmos não são independentes.

Tab. 5.1 – Correlação entre os parâmetros objetivos mediante estudos em 42 salas de concerto (Beranek, 2004)

	$RT_M$	$EDT_M$	$C_{80,3}$	$G_M$	$1-IACC_{E3}$	$LF_{E4}$	BR	ITDG	V	N
$RT_M$	—									
$EDT_M$	<b>0.99</b>	—								
$C_{80,3}$	<b>-0.84</b>	-0.88	—							
$G_M$	0.29	0.27	-0.30	—						
$1-IACC_{E3}$	0.15	0.17	-0.33	0.49	—					
$LF_{E4}$	0.23	0.25	-0.27	0.33	<b>0.71</b>	—				
BR	0.08	0.04	0.03	0.05	-0.13	-0.38	—			
ITDG	-0.48	-0.50	0.57	-0.43	-0.12	-0.20	-0.04	—		
V	0.31	0.27	-0.06	-0.57	-0.53	-0.09	0.20	0.25	—	
N	0.12	0.11	0.02	-0.55	-0.57	-0.28	0.27	0.18	<b>0.83</b>	—

Deve ter-se em mente que a ortogonalidade é referente à independência que os vários parâmetros objetivos têm entre si em termos de cálculo (o que significa que envolvem variáveis diferentes), no entanto, numa sala de concertos, visto que os vários atributos são objetivamente modelados pelos mesmos três campos sonoros (som direto, primeiras reflexões e reflexões tardias), há conseqüentemente há uma ligação entre todos os atributos.

### 5.1.3. Quais os parâmetros mais relevantes?

Mesmo fora do contexto da teoria linear<sup>30</sup>, a importância atribuída aos parâmetros subjetivos varia conforme os resultados dos questionários ou dos experimentos. Já foram referidas várias interpretações de vários autores. Para além dos trabalhos de Beranek, Ando, Hawkes e Douglas, ensaios em Berlim subdividiram dois grupos de espectadores conforme a preferência demonstrada nos resultados, sendo que um grupo elegia clareza, e o outro, o volume sonoro. Também Barron (1988, citado por Barron, 2009), através de questionários, subdivide dois grupos que, de entre a clareza, reverberação, envolvimento<sup>31</sup>, intimidade, e volume sonoro<sup>32</sup>, preferiam ou intimidade ou reverberação. Em Barron (2009) uma comparação entre estas duas pesquisas

<sup>30</sup> Em que os diversos atributos eram pesados, podendo uns compensar a falta de outros, conduzindo a um resultado acústico único

<sup>31</sup> O atributo envolvimento foi substituído numa versão mais tardia do mesmo questionário por amplitude da fonte e envolvimento, uma vez que são as duas subdimensões da dimensão espacialidade (ver ponto 5.1.2.3)

<sup>32</sup> Estes foram os atributos escolhidos para os testes

é feita, de modo a conciliar os resultados, da qual se concluiu que os espectadores devem dividir-se em três grupos no mínimo, aqueles que preferem clareza, aqueles que preferem reverberação, e os que preferem intimidade.

Resumindo, o conceito de cada parâmetro subjetivo é definido de forma semelhante entre os vários autores, sendo que o que por vezes varia é a relevância e o parâmetro objetivo que estes lhe atribuem. Este facto dificulta a descrição da qualidade acústica de uma sala de concertos, sobretudo em fase de desenho, uma vez que para cada uma das várias pessoas, a qualidade da experiência musical deve-se mais a uns atributos do que a outros, embora em todos eles assente<sup>33</sup>. No entanto, por essa mesma razão, o primeiro fio condutor do desenho deve ser precisamente aquele que passa por todos os atributos possíveis, tentando satisfazer cada um ao máximo, sendo que depois, claro, os balanços finais que por vezes obrigam a certos compromissos entre os demais (atributos), devem ter por inspiração, para além da experiência prática da equipa projetista, o cuidadoso trabalho destes autores, cujo esforço de eleição de parâmetros vai precisamente ao encontro de entender aquilo que otimiza a experiência musical da maior parte dos espectadores.

Nesta linha de pensamento, os parâmetros acústicos a seguir apresentados serão aqueles que melhor se adequam ao tipo de caracterização acústica dos componentes arquitetónicos que no capítulo seguinte serão tratados.

## **5.2. Modelação dos atributos**

A modelação dos atributos, ou seja, o conceito dos parâmetros subjetivos e sua quantificação, é feita através das variáveis associadas ao som direto, às primeiras reflexões, e à cauda reverberante (reflexões tardias).

### **5.2.1. Som direto, primeiras reflexões e som reverberante**

Quando um instrumento musical toca num espaço fechado, como uma sala de concertos, o primeiro som que chega ao ouvinte é constituído por ondas sonoras que o alcançam diretamente (som direto). De seguida, reflexões provenientes das paredes laterais, em média de ordem inferior a 3, durante os primeiros 80 ms após o instrumento ter parado de tocar, e por

---

<sup>33</sup> Nisto vale a pena referir que em Barron (2009, p. 222), na revisão dos resultados dos experimentos de Berlim, é inferido que o atributo clareza é de elevada relevância para pessoas com um histórico musical bem definido

isso com bastante energia<sup>34</sup>, envolvem o espectador (primeiras reflexões), seguidas das ondas sonoras, que, depois de tanto serem refletidas (e no processo de reflexão, absorvidas), se tornam fracas (cauda reverberante).

No ponto 4.4 pode ver-se mais sobre a consistência de cada um destes campos.

### 5.2.2. Grupos de parâmetros

Na sua revisão histórica sobre os parâmetros objetivos e subjetivos, Lacatis et al. (2008) divide-os em três grupos mediante um critério de tempo, um critério de energia, e um critério espacial.

O primeiro (critério de tempo) compreende os parâmetros que quantificam a permanência sonora dentro do recinto, ou seja, a reverberação (determinante do grau de vivacidade). Os parâmetros elegidos por Lacatis et al. (2008) para representar o grupo são os tempos de reverberação de alguns autores como Millington, cujas expressões matemáticas apresentam modificações à primeira fórmula que foi a de Sabine, de modo a descrever melhor o comportamento sonoro em ordem ao RT de uma sala (Lacatis et. al, 2008; Takahashi, 2010).

O grupo definido pelo critério de energia abrange os parâmetros que visam descrever a resposta da sala em termos da transmissão do som aos ouvintes de modo nítido, sem que alguns instrumentos fiquem mascarados por outros, promovendo assim a harmonia do conjunto orquestral. Assim sendo, não surpreende que Lacatis et al. (2008) tenha nomeado como representantes do grupo a clareza de Abdel Alim e Reichardt, de 1974, quantificada através do parâmetro  $C_{80}$ , e a força sonora descrita pelo parâmetro objetivo G, definido por Lehman em 1976 (Lacatis et al., 2008).

Por fim, destaca-se o critério espacial. Como o nome indica, os parâmetros deste grupo caracterizam-se por descreverem a sensação de espacialidade ou de se estar envolto pelo som. Após a proposta de Marshall, de 1967, que inferia sobre a importância das primeiras reflexões laterais, a sensação espacial foi dividida pela primeira vez por Morimoto Maekawa (1989, citado por Barron 2009) em duas componentes, o tamanho aparente da fonte (ASW, Apparent source width), quantificado pelo parâmetro objetivo LF, de Marshall e Barron, e mais tarde alternativamente pelo IACC proposto por Ando e Schroeder em 1974 e que integrará a expressão matemática do BQI ( $1 - IACC_{E3}$ )<sup>35</sup>, e o envolvimento proposto por Bradley e Soulodre

---

<sup>34</sup> Em relação ao som direto

<sup>35</sup> O conceito do BQI havia já antes sido proposto por Keet, em 1968

(1995, citado por Barron, 2009 p.42), quantificado pelo parâmetro  $IACC_{L3}$  como integrante do equivalente ao BQI para o som reverberante ( $1 - IACC_{L3}$ ) (Barron, 2009; Lacatis et al., 2008).

A estes três, ainda se acrescentaram mais dois grupos entre os quais o grupo que descreve a resposta do palco.

Como a inserção dos atributos nos grupos é dependente dos parâmetros objetivos que os descrevem, muitas das qualidades subjetivas a seguir apresentadas, às quais por vezes serão relacionados mais do que um parâmetro objetivo, poder-se-iam inserir noutros grupos ao invés daqueles em que estão, no entanto, assumir-se-á a sua pertença a apenas um.

### **5.2.2.1. Critérios de tempo**

#### **a) Tempo de Reverberação (RT) e Vivacidade**

A reverberação é das propriedades acústicas mais importantes de recintos para a música. Define-se como a permanência do som depois de a fonte ter parado a emissão de energia. Quando um instrumento musical emite uma nota, a onda sonora incide nas superfícies que encontra, sendo parte da energia absorvida<sup>36</sup> e outra parte refletida. A parte refletida vai incidir sobre de novo noutras superfícies, sendo de novo absorvida e refletida, perdendo cada vez mais energia no processo, até que se esgota. O tempo dessa permanência é o tempo de reverberação (RT). A sensação associada à reverberação é a de preenchimento sonoro (fullness of tone) (Beranek, 2004; Carrión Isbert, 1998).

Esta é uma característica acústica na qual o compositor se pode inspirar para que a música transmita certa sensação, certa ideia. Há relatos da influência do RT no estilo compositivo, bem como o oposto. Por exemplo, a música barroca que seria apresentada em salões de baile palacianos tinha um ritmo diferente da música que no mesmo período era composta para acompanhar a liturgia nas grandes catedrais ou até nas capelas mais pequenas. Esse ritmo era escolhido em função das características acústico-arquitetónicas, pois o compositor, influenciado por diversos tipos de ambiente, fazia-os refletir-se no carácter das peças musicais. A par deste fenómeno, também o inverso se verifica. Por exemplo, Beethoven, nas suas composições, sobretudo nas últimas, apelava a espaços cujo suporte reverberante fosse maior, para intensificar o dramatismo que viria a ser um marco do repertório romântico que estava a

---

<sup>36</sup> A quantidade absorvida depende das características de absorção da superfície em que a onda incide

emergir. Beranek (2004, p. 12) referindo o génio de Beethoven, esclarece: “... *he wrote almost as though he anticipated the large reverberant halls that would be built in the next 150 years.*”. Sabine acreditava que a diferença rítmica entre a música africana e a europeia tem a ver com os ambientes das civilizações primitivas, pois enquanto que a música africana era manifestada ao ar livre, as tribos da Europa pré-histórica manifestavam a sua musicalidade em cavernas (Long, 2006, citado por Takahashi, 2010).

De um ponto de vista técnico, o tempo de reverberação começa quando o instrumento musical pára de tocar até que o som decaia 60 dB. No entanto, por questões práticas, normalmente o tempo só começa a ser medido depois de o som decair aproximadamente 5 dB (para eliminar o ITDG da medição) e pára de ser medido quando já decaiu 35 dB em relação ao total, multiplicando-se o valor temporal resultante por 2 (para que seja extrapolado para 60 dB) (Beranek, 2004, p. 22). Normalmente, para estes testes, coloca-se sobre as cadeiras um tecido absorvente para simular a audiência, pois a falta desta faz alguma diferença nos resultados (se comparados com os valores em situação de sala cheia) (Passeri Acústica e Arquitetura, 2018). Em alternativa, pode-se-ia medir o RT durante um concerto com audiência, o que não seria fácil, pois ter-se-ia de se esperar por uma pausa um tanto longa. Todavia, ainda assim, esta última possibilidade de medição não oferece a liberdade para medir o RT em vários pontos da sala, ao contrário do que acontece quando esta está vazia, em que se faz o teste de 8 a 20 lugares (Beranek, 2004). As medições são feitas por meio de um estampido (som breve, forte e espectralmente rico) ou da emissão de ruído em bandas de frequência de oitava ou de um terço de oitava<sup>37</sup>. Beranek (2004) refere que, por norma, e como o ouvido humano é mais sensível às alterações de intensidade em frequências médias, os testes executam-se aproximadamente entre bandas de frequência central de 350 e 1400 Hz, ou pode ainda comprimir-se a faixa e medir-se entre 500 Hz e 1000 Hz. O RT nestas bandas de frequência caracteriza a vivacidade da sala. Espaços cujos valores de RT são baixos são chamados “mortos”, enquanto que uma sala com valor de RT alto é considerada um espaço “vivo”. Beranek (2004) conclui da sua pesquisa que as salas mais bem conceituadas têm tempos de reverberação nas médias frequências de 1.8 a 2 segundos, enquanto as que não receberam uma avaliação muito positiva caracterizavam-se por RTmid entre 1.5 a 1.8 segundos. Com tudo isto, tem de ter-se em conta o tipo de repertório ou performance que as salas acolhem<sup>38</sup>, pois o mesmo autor aponta que, em média, um boa

---

<sup>37</sup> O RT final é a média dos RTs nas diversas bandas

<sup>38</sup> Beranek executou uma pesquisa relativa a inúmeras salas de concerto, em que grande parte das mesmas recebem orquestras sinfónicas de cerca de 100 membros, daí os valores apresentados

ópera tem tempos de reverberação entre 1.4 e 1.6 segundos quando ocupada. A tabela 4.2 apresenta recomendações encontradas em Carrión Isbert (1998)<sup>39</sup>.

É de referir que podem ser adotados sistemas arquitetónicos para variar o RT de uma sala, tanto para reduzir, como cortinas e tapeçarias, quanto para aumentar, como câmaras reverberantes. Estas últimas podem ser encontradas em salas como Meyerson Center Hall em Dallas, Texas (fig. 6.10). Todavia, o efeito pode não ser o esperado, como aliás, esse mesmo caso ilustra. De facto, há um aumento da reverberação, mas apenas nas baixas frequências, podendo conduzir a um ambiente acústico demasiado “escuro” para certas obras musicais. Daqui se pode concluir que, perante a possibilidade de integrar este sistema inovador, deve ter-se em conta a dificuldade dos pequenos comprimentos de onda das altas frequências em entrar e sair das câmaras (Beranek, 2004). Mais salas com câmaras de reverberação são referidas no ponto 5.2.2.2.

O RT pode e deve ser integrado ainda em fase de desenho. No capítulo seguinte estudar-se-ão algumas influências neste parâmetro por parte das dimensões e proporções das salas.

Neste contexto, é de referir-se o legado deixado por Sabine na famosa fórmula do tempo de reverberação. A despeito das limitações que um modelo sempre apresenta, esta e outras fórmulas que a seguir vieram permitem perceber a influência de algumas variáveis arquitetónicas na qualidade reverberante do espaço. Por exemplo, a fórmula de Sabine relaciona o volume do recinto e a absorção das superfícies. Daqui se tem, por exemplo, de que modo o crescimento da área acústica total (área da plateia mais área da orquestra) diminui o RT.

Em relação à absorção pela plateia, Beranek (2004) considera a área por pessoa mais importante do que propriamente o número de pessoas, visto que uma mesma área acústica pode acomodar mais ou menos espectadores<sup>40</sup>. Para além disso, Beranek (2004) afirma que é preferível que a audiência se disponha em menos blocos e maiores, do que em mais blocos mais pequenos, devido à absorção lateral.

---

<sup>39</sup> Também outros autores, em conformidade com os seus estudos fazem as suas sugestões. Por exemplo, relativamente às salas para música de câmara, Hidaka e Nishihara (2001) apontam, através das medições que fizeram em 18 salas, tempos de reverberação a frequências médias desde 1.0 a 2.0 segundos, sendo que metade dos casos em estudo têm de 1.65 a 1.76 segundos. Long (2006) apresenta ainda os seguintes valores ideais em função do repertório: para barroco (1.5 – 1.7 s.), para clássico (1.6 – 1.9 s.), e para romântico (1.8–2.2 s.)

<sup>40</sup> Apesar disso, o resultado final da taxa de absorção depende ainda de outros fatores, como a materialidade dos assentos. Por exemplo, se uma sala for constituída por largas cadeiras completamente estofadas, perfazendo uma área de audiência igual à de uma outra sala com a mesma quantidade de assentos, mas com o “braço” sem estofa, o RT por pessoa da segunda sala será maior, embora ambas tenham o mesmo número de assentos e a mesma área acústica. Daí a importância de o estofa das cadeiras desocupadas ter uma taxa de absorção não muito diferente da taxa de absorção da cadeira ocupada

### **a 1) Brilho, RT nas bandas de frequência altas**

Como se verá no próximo capítulo, as frequências altas são facilmente absorvidas por materiais como tapeçarias e outros, bem como pelo ar (apesar de desprezável na maioria das vezes<sup>41</sup>), enquanto que a energia sonora das frequências baixas é dissipada por sistemas de revestimento mais complexos, como painéis de madeira, ressoadores de Helmholtz, etc..., bem como por tubos de órgãos, o que significa que o RT nas altas frequências é mais pequeno. Deve isto ter-se em conta porque uma diminuição significativa da energia dos sons mais agudos (como as linhas melódicas dos violinos) prejudica muito a experiência musical<sup>42</sup>, desprovendo o brilho. Por isso mesmo, visto que a humidade das salas de concerto não costuma ser controlada, e uma vez que a absorção por parte dos espectadores é inevitável, devem evitar-se ao máximo os absorventes porosos nas superfícies refletoras (Beranek, 2004).

### **b) Calor, BR, G<sub>low</sub>**

A sensação de calor está relacionada com o suporte (acústico) aos baixos por parte da sala. Uma das características da música orquestral é a grande tessitura do conjunto dos instrumentos. Frequentemente, os compositores tiram daí proveito para conduzir a música ao clímax, e se a sala não permitir que os baixos sejam claramente percebidos, desfavorece muito a orquestração. Uma das principais críticas ao antigo New York Filarmonic Hall foi a falta de calor acústico no piso principal. Nessa experiência tornou-se evidente que sem paredes refletoras próximas da audiência, a sensação de calor perde-se se o chão não for convenientemente inclinado, pois as baixas frequências são atenuadas ao incidir nas filas da audiência (“grazing incidence”, ver ponto 6.3.5.1) (Barron, 2009).

Apesar de as frequências baixas não serem tão facilmente absorvidas quanto as altas, sistemas de revestimento em painéis de madeira fina, sobretudo se forem desencostados da parede, bem como os tubos dos órgãos, podem conduzir a uma falta de calor acústico (Barron, 2009; Beranek, 2004; Carrión Isbert, 1998).

Não deve no entanto esquecer-se que uma exagerada força sonora de baixos em relação às médias e altas frequências origina um ambiente acústico escuro, o que pode acontecer na

---

<sup>41</sup> A absorção pelo ar só se torna significativa a partir dos 1500 Hz, tornando-se notável a partir dos 2000 Hz e em situações de humidade relativa muito baixa

<sup>42</sup> Um efeito oposto à falta de brilho é o encandeamento, mas este é melhor caracterizado pela força sonora dos sons agudos, os quais incidindo numa superfície muito reflectante, sem qualquer característica difusora, se tornam demasiado “estridentes”

presença de materiais como tapeçarias e carpetes, que absorvem as frequências altas, ou mesmo quando a integração de sistemas como câmaras reverberantes (como em Dallas) dificultam a entrada e saída das altas frequências, enquanto promovem a duração dos sons graves na sala (Beranek, 2004).

Em Beranek (2004) são descritas três formas de quantificar a sensação de calor. A primeira, *Bass Ratio*, é definida pela razão entre a soma dos tempos de reverberação (com a sala ocupada) nas bandas de 125 e 250 Hz e a soma daqueles nas bandas de 500 e 1000 Hz. A procura de uma segunda hipótese deve-se à baixa correlação entre os resultados de BR e as avaliações subjetivas das respetivas salas, mas logo a segunda solução, que consiste na subtração da força das frequências médias pela força das baixas ( $(G_{125}+G_{250}) - (G_{500}+G_{1000})$ ), também não se mostrou a que melhor descreve o atributo. Uma terceira aproximação, que se mostrou mais eficaz, consiste na simples medição da força sonora na banda de frequência central de 125 Hz.

### **c) Tempo de decaimento inicial (EDT)**

O tempo de decaimento inicial é também a permanência do som após o músico ter parado de tocar, mas até decair 10 dB apenas. É um fator muito importante. Há até indícios, pelos questionários e sondagens de Beranek (2004) que este parâmetro se correlaciona melhor com avaliação subjetiva das salas em estudo, constituindo assim um melhor indicador de qualidade acústica em comparação com o RT. Mas isso assim acontece porque (sobretudo) os violinos em composições sinfónicas tocam rápido, sendo apenas perceptível a fase inicial do decaimento sonoro. Para efeitos de comparação com o RT, o EDT é multiplicado por 6 (devido aos 60 dB de decaimento para o RT).

Segundo o estudo de Beranek (2004), para música sinfónica, aquelas que são consideradas as melhores salas têm um EDT entre 2.25 e 2.75 segundos, e as menos bem classificadas, entre 1.4 e 2.0 segundos. Resta concluir que o EDT não substitui o RT, sendo antes uma medida complementar.

Comparando o EDT com o RT pode inferir-se sobre o grau de difusão da sala. Por exemplo, valores semelhantes indicam um rico campo difuso, como se pode verificar com o caso da sala Musikvereinsaal de Viena (ver secção 7.3.3.1), enquanto que valores de EDT consideravelmente mais baixos que o RT evidenciam uma sensação de reverberação mais desfavorecida, a menos que o RT seja mais alto que os valores tidos como referência. Christchurch Hall, na Nova Zelândia

(fig. 6.25), é um bom exemplo. Nesta sala, como as superfícies orientam o som diretamente para a audiência, os primeiros 10 dB decaem mais rápido do que o que se costuma observar, conduzindo a um EDT correspondente a apenas 82% do RT nas médias frequências. No entanto, o RT de 2.3 segundos permite que o balanço acústico entre a reverberação e a clareza seja aceitável e mesmo ótimo para muitos espectadores. Na reconstrução de Londres após a segunda guerra mundial, no projeto do Royal Festival Hall (fig. 5.3), Bagenal tentou combater as divergências de requisitos em relação ao RT para música coral (mais elevado), e sinfônica (inferior em relação ao anterior). A sua filosofia visava a construção para um elevado RT, mas com superfícies próximas à fonte sonora (teto) que direcionassem as primeiras reflexões para a audiência, proporcionando boas sensações de reverberação e ao mesmo tempo de clareza. Neste tipo de caso, à semelhança de Christchurch Hall, um elevado tempo de reverberação teria sido necessário para que o ambiente não ficasse “apagado” ou “seco”; no entanto, não foi o que sucedeu (Barron, 2009).

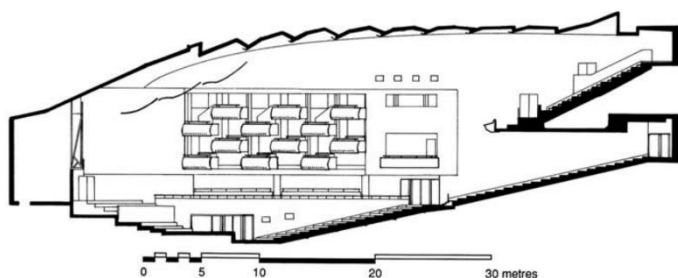


Fig. 5.3—Royal Festival Hall, Corte Longitudinal (Barron, 2009)

#### **d) Intimidade, ITDG**

*“The subjective impression of listening to music in a large room and its sounding as though the room were small is one definition of intimacy” (Beranek, 2004, p. 513).*

O espaço é percebido por várias dimensões sensoriais. No entanto, não fugindo ao escopo deste trabalho, focalize-se a atenção na dimensão sonora. O ser humano apropria-se do espaço através do som, e pode até dizer-se que há um maior grau de noção espacial através do som, do que através, por exemplo, da visão, pois o ângulo de visão é mais pequeno que o ângulo de audição<sup>43</sup>. Num ambiente selvagem um homem não vê o predador que está atrás de si, mas fica em estado alerta porque ouve o abanar da folhagem. Num ambiente fechado amplo, como uma

<sup>43</sup> Embora a sensibilidade da audição varie com a direção

ópera ou sala de concertos, o tempo entre a chegada do som direto e a da primeira reflexão, bem como a sua consequente força e a das reflexões sucessivas, traduzem-se inconscientemente numa perceção da dimensão da sala. Se esse tempo (ITDG) for pequeno, o espaço parece mais pequeno também, mais acolhedor, e a experiência torna-se mais íntima (fig.5.4) (Beranek, 2004).

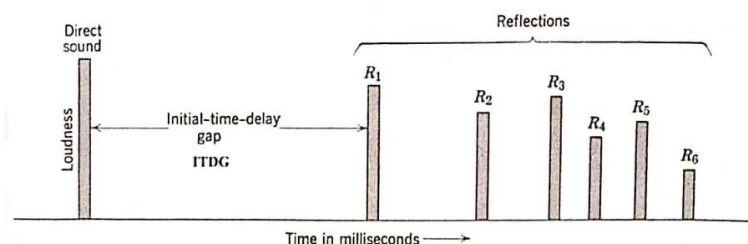


Fig. 5.4—ITDG (Beranek, 2004)

Beranek foi pioneiro no estabelecimento do ITDG como indicador da sensação de intimidade, e, face ao que acima foi descrito, essa atribuição justifica-se. No entanto, em Barron (2009) não é tomada a mesma posição, embora o seu conceito de intimidade apresente alguma correlação com aquele de Beranek: “...intimacy refers to one’s degree of identification with the performance, whether one felt acoustically involved or detached from it...” (Barron, 2009, p. 43). Barron acredita que o nível sonoro se correlaciona melhor com a intimidade, argumentando que pesquisas mais recentes não comprovam o ITDG seja de facto importante, e que, observando geometrias simples (fig. 5.5), o ITDG é maior em lugares mais próximos do palco do que em lugares distantes<sup>44</sup>, o que implicaria que os espectadores na imediação da orquestra tivessem uma inferior sensação de intimidade, o que não parece corresponder ao resultado das pesquisas de Hawkes e Douglas (1971, citado por Barron, 2009) e Barron (1988, citado por Barron, 2009), que evidenciam uma relação entre a proximidade do palco e a sensação de intimidade.

No entanto, o modelo (representado na figura 5.5) que conduz o argumento de Barron baseia-se na técnica da acústica geometria IMS (“Image Source Method”), a qual despreza qualquer carácter difusor da envolvente da sala, o qual introduziria alguma alteração à diferença referida entre o intervalo de tempo entre o som direto e a primeira reflexão junto ao palco e aquele em lugares mais afastados.

<sup>44</sup> A diferença entre os caminhos do som direto e do som refletido é, segundo se pode observar pelas reflexões especulares, maior em lugares mais próximos do palco do que em lugares mais afastados

Segundo Beranek (2004) descreve, as salas de concerto mais bem categorizadas têm valores de ITDG de 25 ms ou menos. Nas salas de ópera, dependendo da sua localização geográfica em relação ao idioma das obras aí mais comumente realizadas, o ITDG pode ter menos margem ainda do que se se tratar de uma sala de concertos. Por exemplo, se a sala de ópera estiver num país europeu como Alemanha ou Itália, então mais provável é que a grande maioria dos espectadores espere compreender o texto, sendo que se torna necessário um ITDG menor<sup>45</sup>. Opostamente, nas salas de ópera no Japão, ou em outros locais em que as obras sejam de língua estrangeira, o âmbito aceitável para o parâmetro aumenta.

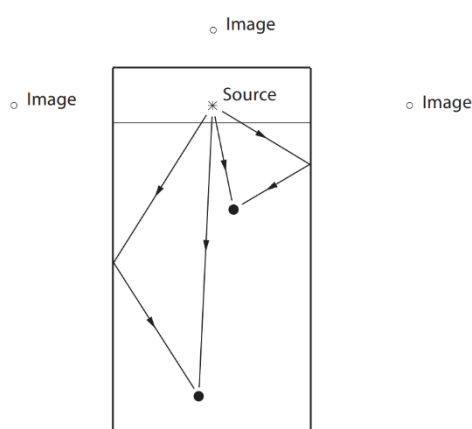


Fig. 5.5– Diferença entre as distâncias a percorrer pelo som direto e primeira reflexão junto do palco em comparação com aquela em lugares afastados do palco, segundo a acústica geométrica (Barron, 2009)

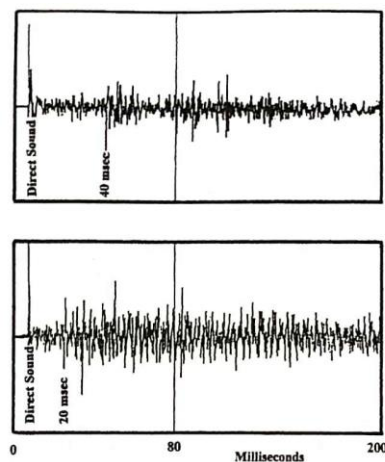


Fig. 5.6– Gráficos de resposta ao impulso (Beranek, 2004)

O ITDG é obtido através de gráficos de resposta da sala, como os da figura 5.6, traçados para uma posição próxima do centro da sala (um lugar afastado das superfícies refletoras). Nessa posição, um microfone capta um impulso sonoro vindo do palco (Beranek, 2004).

Três salas de concerto despoletaram em Beranek a ideia associativa entre a intimidade e o ITDG. Foram elas a Tanglewood Music Shed, a Aula Magna da universidade de Caracas, na Venezuela, e uma sala retangular em Chicago (destruída pelo fogo). Os dois primeiros recintos são em forma de leque. A Tanglewood, para compensar a sua grande dimensão (acolhe cerca de 5121 pessoas só no interior, pois parte das superfícies laterais podem abrir para que 10 000 espectadores

<sup>45</sup> Um ITDG menor é sinónimo de primeiras reflexões mais fortes, aumentando a inteligibilidade

externos desfrutem do concerto), integrou painéis horizontais suspensos, o que reduziu o ITDG de 45 ms para 19 ms. Segundo Beranek (2004) regista, a sua acústica tornou-se incrivelmente melhor. A sala de Chicago é um caso interessante, pois era retangular e o seu RT era de 1,7 segundos, dentro da zona aceitável, mas o facto de ser muito larga e de não haver sequer superfícies refletoras junto do proscénio prejudicava grandemente a sensação de intimidade. Nesta sala o ITDG era 40 ms (Beranek, 2004).

### ***e) Textura***

A textura está estreitamente relacionada com a intimidade. É um conceito relativo ao padrão temporal e quantidade das primeiras reflexões. É um parâmetro de caracterização difícil, pois embora os reflectogramas como os da figura 5.6 forneçam informações relevantes, a determinação do número de primeiras reflexões é imprecisa (Beranek, 2004). Não obstante, já há métodos matemáticos que auxiliam na contagem, através de um procedimento “*Envelop Function, EF*” (Kuttruff, 2000, citado por Beranek, 2004).

Quanto mais pequeno for o ITDG, melhor, pois conduz a um maior número de primeiras reflexões. Importa também que o espaçamento temporal entre essas seja relativamente uniforme, caso contrário, ainda que os outros parâmetros acústicos como RT, etc, estejam dentro dos valores recomendados, vai parecer que há algo em falta (Beranek, 2004).

Através das avaliações de Hidaka e Beranek (2002, citado por Beranek, 2004, p. 528) feitas a 23 salas de ópera espalhadas pela Europa, Japão e América, Hidaka concluiu, aplicando o método de contagem acima descrito, que as óperas mais bem conceituadas têm mais de 17 reflexões “pico” durante os primeiros 80 ms após a fonte ter parado a emissão, outras de média classificação, têm de 10 a 16, e aquelas de classificação mais baixa, têm menos de 10.

### **5.2.2.2. Critério de energia**

#### ***a) Força sonora, sensação de volume sonoro, G***

A resposta de uma sala de concertos ou de qualquer recinto para a música ao nível sonoro produzido por uma orquestra, bem como à dinâmica, é extremamente importante. A dinâmica ou fraseado (*fortes, pianos...*) orquestral é essencial na experiência musical, assim, todo o material acústico, incluindo a sala, deve corresponder à ideia musical. O surgimento do piano, e

depois do piano forte, ficaram marcados não só pelo timbre diferente resultante das cordas de aço e da densidade do instrumento, mas também pelo “touché”. Podia tocar-se de modo suave e forte. Também os órgãos de tubos foram constituindo modificações que permitem ao organista, por meio de pedais, regular a intensidade sonora conforme a música o “pede”. De modo análogo, também uma sala de concertos deve procurar satisfazer os “pedidos” da música, respondendo aos pianísimos e aos fortísimos. Para que o espaço seja sensível a estas diferenças de nível sonoro, um bom isolamento do ambiente acústico exterior é essencial, bem como nos dispositivos de ar condicionado ou em qualquer outro de tipo de mecanismo de controlo ambiental. Depois, é de primeira ordem que as dimensões da sala sejam adequadas. Por exemplo uma sala muito larga não dará (pelo menos sem o auxílio de algum sistema complementar) o suporte aos *fortísimos* do mesmo modo que uma sala mais estreita. Também a materialidade interfere. Por exemplo, dispositivos de absorção sonora, como o estofado das cadeiras, carpetes e cortinas, painéis de madeira, e ainda os tubos dos órgãos, são grandes condicionadores da força sonora de um recinto. A área acústica total (área da audiência mais a área da orquestra) é também um parâmetro muito importante. As salas de concerto mais antigas, e de muito boa conotação, têm os lugares da audiência mais comprimidos do que as salas mais modernas, para que possa haver, na mesma área acústica, mais lugares. É o caso de Boston Symphony Hall. Mas mesmo numa mesma área acústica, uma audiência de, por exemplo, 1000 pessoas é sujeita a uma maior força sonora (5 dB a mais, pois triplica) do que uma audiência de 3000, se o RT for igual<sup>46</sup>.

Um acréscimo de 10 dB na força sonora indica uma sensação de que o “volume” sonoro duplicou (Beranek, 2004).

Um espaço muito reverberante, ou seja, que conserva o som por mais tempo, também proporcionará uma sensação de “volume” sonoro maior do que um espaço mais seco, desde que ambos tenham o mesmo volume (espacial), a mesma área acústica e o mesmo número de lugares (Beranek, 2004).

A redução do som direto com a distância (incontrariável fenómeno da natureza) pode ser compensada através de um bom suporte das primeiras reflexões. Uma sala retangular estreita já fornece esse suporte, mas em casos de salas semi-elípticas ou semi-circulares (em que as paredes laterais encaminham o som para a parede de fundo), é necessária a incorporação de

---

<sup>46</sup> O que depende da materialidade das cadeiras e do espaço entre elas

painéis nas paredes laterais ou no teto para que encaminhem as ondas sonoras que neles incidem para a audiência (Beranek, 2004).

A força sonora é obtida através da relação entre duas quantidades: o nível sonoro num certo local da sala que vem de uma fonte omnidirecional situada no palco e o nível sonoro a 10 metros da mesma fonte medido numa sala anecoica. (A equação que descreve esta relação, caracterizada pelo parâmetro G, pode ser encontrada no anexo C, eq. C2)

O nível sonoro é medido em todas as bandas de frequência (audível). Lehman e Wilkens (1980, citado por Barron, 2009) propuseram um valor mínimo de +3 dB do nível total sonoro numa sala<sup>47</sup>, mas foi considerado um valor demasiado elevado, considerando-se os 0 dB como um valor aceitável<sup>48</sup>.

#### **b) Clareza Musical, $C_{80}$**

A clareza musical é um parâmetro acústico que designa a capacidade em se distinguirem diferentes notas musicais numa música, tanto em acordes<sup>49</sup> (clareza vertical), quanto em linhas melódicas<sup>50</sup> (clareza horizontal) (Beranek, 2004). É uma característica que depende, em primeiro lugar, das próprias composição e execução musical, e depois, da acústica do recinto. A clareza vertical depende do estilo musical, se é contrapontual (como as fugas de Bach), se é coral, ou se acompanha uma melodia; e depende também da resposta do recinto às baixas, médias e altas frequências, bem como da capacidade da envolvente do palco em misturar os sons dos diferentes instrumentos orquestrais ou vozes e transmitir à plateia, e ainda da capacidade do resto da sala em promover um campo sonoro minimamente homogéneo<sup>51</sup> (por exemplo, sem enfatizar certas notas musicais, o que pode acontecer, por exemplo, devido aos modos próprios da sala, ou à proximidade a superfícies muito lisas e reflectantes<sup>52</sup>). A clareza horizontal é função da rapidez de execução, número de notas e intensidade relativa entre elas, bem como do ambiente acústico promovido pela arquitetura, nomeadamente no que diz respeito à razão entre a energia das primeiras reflexões e aquela da cauda reverberante<sup>53</sup> (fig. 5.7) (Barron, 2009; Beranek, 2004; Mateus, 2008).

---

<sup>47</sup> O que significa que, uma vez que o som direto decai 6 m cada vez que a distância à fonte duplica, a sala com estas condições amplifica o som através das reflexões de modo que no lugar em questão o nível sonoro global seja pelo menos o dobro do nível sonoro produzido pela orquestra

<sup>48</sup> O que significa que a energia total que chega a um lugar foi amplificada pela sala de modo a não ser inferior à energia produzida pela orquestra

<sup>49</sup> Notas tocadas em simultâneo

<sup>50</sup> Notas tocadas consecutivamente

<sup>51</sup> Embora não haja campos perfeitamente homogéneos

<sup>52</sup> Fenómeno de encandeamento acústico

<sup>53</sup> Este é também um fator preponderante para a clareza vertical, mas sobretudo para a horizontal

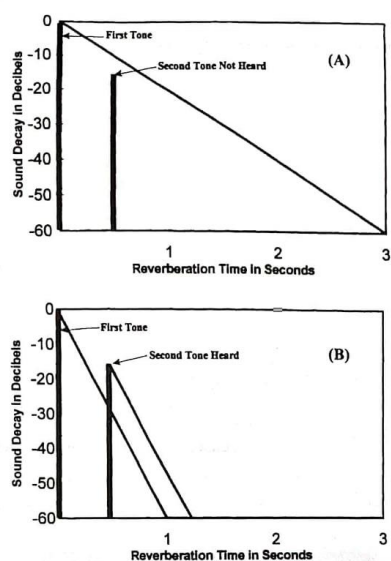


Fig. 5.7– Relação entre o tempo de reverberação e a rapidez de duas notas tocadas consecutivamente. No gráfico A pode ver-se como a primeira nota “mascara” a segunda, devido ao elevado tempo de reverberação, enquanto que no gráfico B, as duas notas são claramente audíveis, sem, no entanto, o ambiente acústico ser demasiado “apagado” ou “morto”, o que promove o preenchimento sonoro entre ambas (Beranek, 2004)

$C_{80}$  é o parâmetro que Reichard e Abdel Alim em 1974 propuseram como quantificador da sensação de clareza ou definição<sup>54</sup>. Este parâmetro relaciona a energia nos primeiros 80 ms com a energia reverberante. É obtido através da gravação, em diferentes lugares, de um som impulsivo emitido em palco. Normalmente são utilizadas as bandas de oitava de frequência central de 500, 1000 e 2000 Hz (Beranek, 2004; Lacatis et al., 2008).

Por norma, a clareza musical é inversamente proporcional ao tempo de reverberação, mas há casos excepcionais, como Meyerson Center Hall, em Dallas (Eugene McDermott Concert Hall in Morton H. Meyerson Symphony Center) (fig. 6.10), Symphony Hall, em Birmingham (Inglaterra) (figs. 5.8 e 5.9) e Congress Center Hall, em Lucerne (fig. 5.10 e 5.11), que possuem câmaras reverberantes dos lados para aumentar os tempos de reverberação (quando desejado). Como este aumento é apenas significativo nas baixas frequências<sup>55</sup>, este sistema promove a clareza dos violinos (que pertencem ao grupo dos instrumentos que costumam ter linhas mais rápidas), e ao mesmo tempo a sensação de calor, o que confere à sala um carisma próprio. Todavia, e como já foi referido, esta solução tem o seu senão. Em Beranek (2004) é referido que em Dallas (fig. 6.10) o contraste entre o apoio aos graves e o apoio ao restante espectro confere à sala um ambiente que, de acordo o parecer de alguns, pode tornar-se demasiado escuro (acusticamente) para certas obras, prejudicando a intenção do compositor. A despeito de tal, deve valorizar-se que um suporte adequado de baixos é muito importante nas sensações de calor acústico e de espacialidade (Beranek, 2004).

<sup>54</sup> Os mesmos autores propuseram ainda o índice  $C_{50}$  como parâmetro definidor da inteligibilidade, que é o equivalente em contexto de discurso

<sup>55</sup> Na sala de Dallas abaixo dos 500Hz

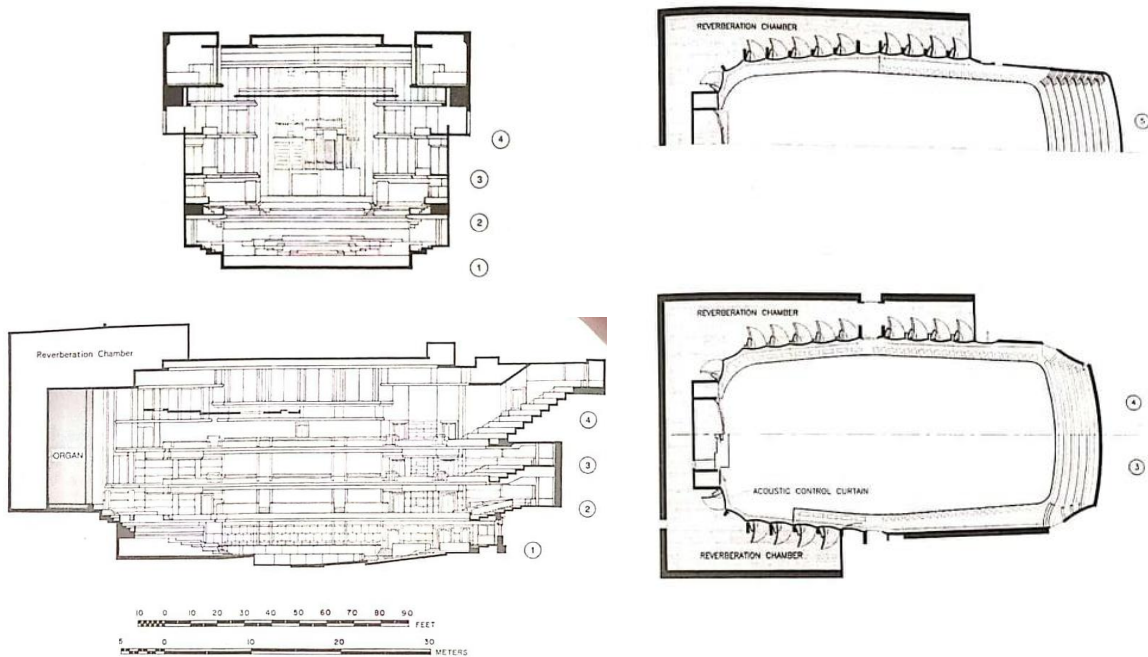


Fig. 5.8– Symphony Hall, Birmingham. Cortes (Beranek, 2004)



Fig. 5.9– Symphony Hall, Birmingham, perspectiva (Martson, 2013)

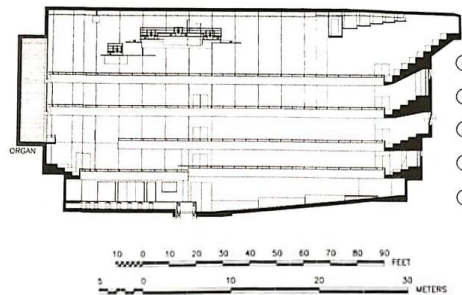
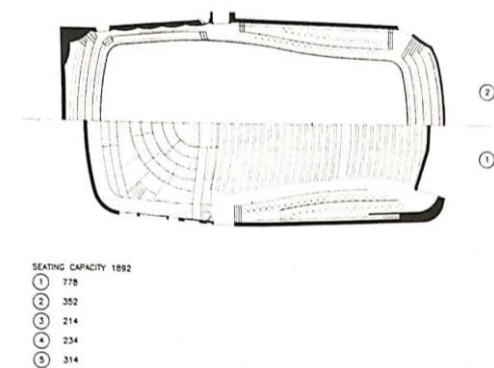


Fig. 5.11– Culture and Congress Center Concert Hall, Lucerne. Plantas e Corte (Beranek, 2004)

Fig. 5.10– Culture and Congress Center Concert Hall, Lucerne, perspectiva (KKL Lucerne Management AG, 2020)

Um valor de  $C_{80}$  muito negativo é um indicador de uma alta reverberação, e portanto, de um espaço muito “vivo”, enquanto que um valor muito positivo indica muita clareza, e uma sala

muito “morta”. Quando a medição conduz a um valor de  $C_{80}$  de 0 dB, então pode concluir-se que a energia das primeiras reflexões da sala se iguala à energia reverberante (Beranek, 2004).

Diferentes repertórios e diferentes situações de interpretação requisitam diferentes valores de  $C_{80}$ . Por exemplo, a *Toccatá em Ré Menor* de Bach<sup>56</sup>, alcança um potencial arrebatador em espaços com 3 segundos ou mais de RT, enquanto que, uma fuga contrapontística para cravo, ainda que do mesmo compositor e da mesma época, fica perdida num espaço tão vivo. Em peças orquestrais, mesmo para Música Romântica, por vezes os maestros preferem espaços com valores de  $C_{80}$  acima dos ideais em situação de concerto. Valores entre +1 e +5 dB proporcionam uma noção mais detalhada da música. Em termos genéricos, segundo os estudos de Beranek (2004), as salas mais bem conceituadas têm índices de clareza entre -1 e -5 dB.

### 5.2.2.3. Critério de espaço

#### a) Espacialidade

O parâmetro subjetivo “espacialidade” é considerado dos mais importantes, e, em resposta à tese de Marshall, de 1967, sobre a importância das reflexões laterais, foi desenvolvida a hipótese por Morimoto e Maekawa (1989, citado por Barron, 2009) de haver duas sensações espaciais, a percepção do tamanho aparente da fonte, cuja denominação já era uma alternativa designação da sensação de espacialidade, e uma sensação de envolvimento musical (LEV), assim denominada por Bradley e Soulodre (1995, citado por Barron, 2009). A figura 5.12 ilustra os dois efeitos relacionados com a sensação de espacialidade.

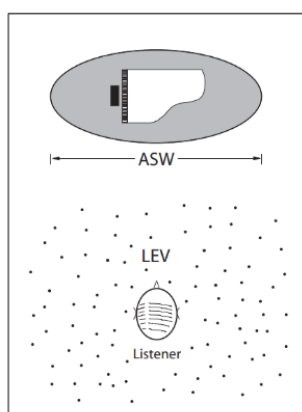


Fig. 5.12– Representação gráfica dos efeitos relacionados com a sensação de espacialidade: dimensão aparente da fonte (ASW) e envolvimento (LEV) (Morimoto e Maekawa, 1989, citado por Barron, 2009)

<sup>56</sup> Obra organística

### **a1) Tamanho aparente da fonte (ASW), LF E BQI**

Siebdein e Kinzey (1999, citado por Takahaski) explicam a percepção do tamanho da fonte através do exemplo de um aparelho constituído por duas caixas acústicas que, aquando da reprodução de uma música numa sala, se vão gradualmente afastando, até que alcancem os limites do espaço. O espectador de tal experiência vai sentir que o tamanho da fonte é maior do que o tamanho real.

Marshall e Barron (1981, citado por Beranek, 2004; Barron, 2009) propõem uma forma de caracterizar a capacidade da sala em direcionar as reflexões lateralmente. A fração lateral (LF, Lateral Fraction) relaciona a energia que chega lateralmente com a energia total no mesmo lugar. Em testes de laboratório esta medida correlaciona-se fortemente com o ASW. O LF é medido em 4 bandas de oitava de frequências centrais 125, 250, 500 e 1000 Hz ( $LF_{E4}$ ). Marshall e Barron defendiam a influência das frequências baixas na sensação de espacialidade (embora em Beranek (2004), as determinações de LF a partir dos dados recolhidos de salas de concerto não confirmem essa ideia). Posteriormente, Ando (1985, citado por Barron 2009) propôs o índice IACC como caracterizador do tamanho aparente da fonte sonora. Essa tese foi enfatizada por Hidaka, Beranek e Okano (1995, citado por Barron 2009), que consideravam tal parâmetro mais próximo de caracterizar a qualidade acústica de um recinto do que o LF, sendo que em Beranek (2004), o BQI, já antes proposto por Keet, em 1968, e posteriormente definido pelo índice IACC sob a forma de  $1 - IACC_{E3}^{57}$ , é definido como uma alternativa mais fiável para descrever o atributo. Tal teoria justifica-se pela resposta cerebral à diferença temporal e energética do som em cada ouvido. O som chega ao cérebro binauralmente, ou seja, através dos dois ouvidos, mas não alcança os dois ouvidos ao mesmo tempo nem com a mesma intensidade. Por exemplo, um som refletido por uma parede à direita do ouvinte chega ligeiramente mais tarde à orelha esquerda, e mais fraco, pois a cabeça origina uma zona de sombra. O BQI é medido entre as bandas de frequência (central) de 350 a 2850 Hz. Em Beranek (2004), as salas preferidas apresentavam valores de BQI acima de 0.6 e as salas satisfatórias acima de 0.5, o que indica que, para boas salas<sup>58</sup>, a similaridade entre o som que chega a cada orelha é baixa (Beranek, 2004, Lacatis et al., 2008).

O BQI determinado em salas desocupadas permite estimar o mesmo parâmetro na sala ocupada através de um decréscimo de 10% (Beranek, 2004).

---

<sup>57</sup> Em que E indica early de primeiras reflexões- até aos 80 ms, e 3 indica as três bandas de frequência de 500, 1000, e 2000 Hz

<sup>58</sup> É de reforçar que as boas salas são fruto da satisfação de uma imensidão de fatores, não de um isolado

## **a2) Envolvimento**

A sensação de envolvimento musical é caracterizada pela sensação de se estar envolto por som. Para que tal aconteça, estudos de Damaske (1967, citado por Barron, 2009) evidenciaram que basta a distribuição sonora por quatro direções. Esta descoberta inspirou a construção de salas com uma geometria promotora das reflexões laterais, como a De Doellen Concert Hall (fig. 6.29), em Roterdão, ao invés de salas intergrantes de enormes quantidades de elementos difusores, como a Beethovenhalle, em Bonn (fig. 6.32) (Barron, 2009).

O parâmetro de caracterização da sensação de envolvimento é o equivalente ao BQI, mas para o som reverberante, ou seja,  $1 - IACC_{L3}$  (em que L indica as reflexões após os 80 ms até cerca de 1 segundo depois, e o 3, as três bandas de frequência central 5000, 1000, e 2000 Hz) (Beranek, 2004).

## **b) Índice de Difusão, SDI**

Um dos carismas das grandes salas clássicas é a rica ornamentação. Os que estudam o desempenho acústico das mesmas logo entendem que essa característica é crucial para o sucesso de uma sala de concertos. Nos anos 50, a reconstrução britânica desta tipologia de espaços apoiava-se no estudo geométrico das salas clássicas, mas um grupo em Gottingen, ao invés, prestava a sua atenção nas suas características difusoras, pois conheciam que essas são promotoras da sensação de espacialidade. Em Beethovenhalle uma filosofia construtiva apoiada na integração em massa de elementos difusores foi levada ao limite (fig. 6.32).

Mais tarde, estudos da mesma escola de Gottingen evidenciaram que não é necessário que o som chegue ao ouvinte de todas as direções possíveis para que este se sinta completamente envolto. Damaske (1967, citado por Barron, 2009) confirmou a premissa, apontando para a necessidade de o som alcançar o espectador apenas de quatro sentidos distribuídos.

Beranek (2004) chama a atenção para a escala das ornamentações nas superfícies mais associadas às primeiras reflexões e para aquela nas superfícies mais associadas ao som reverberante. Este autor aponta para uma profundidade de cerca de 2,5 cm a 5 cm nas irregularidades das primeiras, para que se evite a coloração tonal. Na figura 5.13 pode comparar-se os efeitos associados à difusão por parte de um painel QRD e aqueles associados à reflexão

especular que aconteceria se a superfície de incidência da mesma onda fosse completamente lisa. As medições foram feitas à escala de 1/5, a qual exige a utilização das bandas de 4000, 8000 e 16 000 Hz a simular as frequências médias (daí a transposição para bandas não muito comuns como as da figura) (Beranek, 2004).

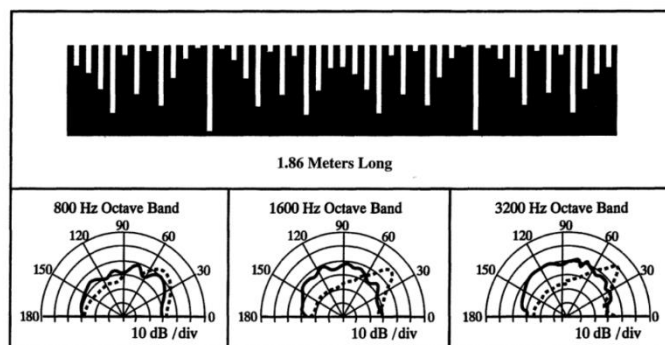


Fig. 5.13– Efeito acústico associado à difusão (linha contínua) por parte de um QRD em comparação com o efeito acústico associado à reflexão especular da mesma onda se esta incidisse numa superfície muito reflectante (Beranek, 2004)

Quando as superfícies associadas às primeiras reflexões são muito lisas, acontece aquilo a que se chama “encandeamento acústico”, que, analogamente ao encandeamento óptico, é causado por reflexões muito intensas de certas frequências (por norma reflexões especulares). Ao favorecimento de certas frequências em relação às outras chama-se coloração. Este fenómeno acústico aconteceu no New York Filarmonic hall (agora Avery Fisher Hall) (Beranek, 2004).

Haan e Frick (1993, citado por Beranek, 2004) desenvolveram um método para classificar uma sala de concertos em relação ao grau de difusão, Sound Diffusivity index (SDI), o qual consiste numa atribuição de pontos às superfícies consoante o seu grau de difusão. Às superfícies muito difusas é atribuído 1 ponto, às de média difusão, 0.5, e às de baixa difusão, 0 pontos. Esses pontos eram multiplicados pelas áreas das superfícies correspondentes, ao que os resultados eram somados e posteriormente divididos pela área total das superfícies. Resumidamente, o método de Haan e Frick era fazer o valor médio de difusão por unidade de área, sendo que as áreas das superfícies eram ponderadas. Nem todas as superfícies eram contadas. Pode ver-se mais sobre esta técnica e a sua aplicação concreta no ponto 6.5.2.

#### **5.2.2.4. Critério de palco**

##### **a) Harmonia do conjunto, ST1**

O palco merece uma atenção particular. Isto porque o seu desempenho acústico deve responder a requisitos também eles particulares. Este espaço deve promover uma boa comunicação sonora entre os músicos, e visual entre os músicos e o maestro, para que assim o conjunto orquestral possa tocar em harmonia, sem, por exemplo, a ocorrência de mascaramentos por parte de certos instrumentos, ou de focalizações sonoras incomodativas. Para além disso, a envolvente do palco tem de ter configuração, disposição, dimensão, e localização tais que o som orquestral seja adequadamente transmitido ao corpo principal.

A dimensão, a configuração e a materialidade da envolvente devem proporcionar uma boa comunicação entre os vários elementos da orquestra via som direto e primeiras reflexões. Num palco sem envolvente própria os músicos têm uma maior noção da acústica na plateia. Por sua vez, uma envolvente exclusiva para o corpo do palco permite, na maior parte dos casos, um maior controlo e flexibilidade acústica sem que possíveis alterações nesse ponto do recinto interfiram com a acústica do corpo principal, sendo que, para além disso, uma envolvente própria promove um apoio acústico particular aos músicos. No entanto, esse apoio pode ser exagerado, quando, por exemplo, a concha acústica é muito recuada e a orquestra fica muito separada da sala. Nestes casos os músicos ficam num ambiente acústico bem distinto do ambiente do corpo principal, o que faz com que toquem mais baixo. Barron (2009) recomenda que o EDT no palco não seja menos do que 70% do EDT no resto da sala.

A qualidade acústica do palco é quantificada pelo parâmetro Suporte de palco (Objective Support, ST1), o qual descreve o apoio das superfícies envolventes do palco aos músicos, para que se oiçam a si mesmos e aos outros. Este parâmetro compreende a relação entre a energia recebida por um microfone durante os primeiros 10 ms após a emissão de um som impulsivo de uma fonte omnidirecional a 1 m de distância e a energia recebida na mesma posição entre 20 a 100 ms (Beranek, 2004).

Em Barron (2009) é demonstrada uma correlação entre o ST1 e o volume do palco, sendo que a energia das primeiras reflexões decresce quando o volume aumenta. Gade (1989, citado por Barron, 2009) aponta para valores ótimos de ST1 entre -13 e -11 dB, sendo que estudos recentes

o confirmam e ainda indicam que uma certa reverberação favorece a harmonia do conjunto orquestral (Ueno & Tachibana, 2003, citado por Barron, 2009).

***b) Resposta ou ataque da sala***

O ataque da sala é um atributo referente ao modo como a arquitetura apoia acusticamente o músico, ou seja, o modo como a sala lhe responde. Como já foi visto, se apenas a envolvente do palco refletir o som para os músicos, estes vão ter pouca noção da acústica geral da sala, por isso, o desenho do proscénio também deve ter-se em grande consideração. Por outro lado, se o corpo principal refletir demasiada energia para o palco, o ambiente torna-se desconfortável para a orquestra (Beranek, 2004).

## 6. A “ORGANOLOGIA” DAS SALAS DE CONCERTO: INTEGRAÇÃO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS NO DESENHO ARQUITETÓNICO

*“A música contém dois elementos: o material acústico e a ideia intelectual. Estes não coexistem apenas como forma e conteúdo, mas combinam-se, na música, para formar uma imagem una.”*

Ulrich Michels, 2003, p.11

Em concordância com a linha de estudo seguida até agora, este capítulo colocará em destaque a integração de conhecimento acústico no desenho das grandes salas de concerto<sup>59</sup>, e diga-se por grande salas acima dos 800 lugares. Não obstante, a lógica da triagem do conhecimento nessa integração é aplicável a qualquer outro tipo de recinto, pois que a mesma consiste no estabelecimento de relações entre várias soluções formais e materiais e as implicações na configuração do campo sonoro. A compreensão dessas relações permite inferir sobre a satisfação dos parâmetros acústicos subjetivos, e consequentemente, objetivos.

A integração dos parâmetros acústicos será aqui abordada por meio de um processo metodológico no qual, após as considerações subjetivas gerais sobre o ambiente acústico, toma a primazia o desenho preliminar, em função do volume e da lotação em relação com o tempo de reverberação e força sonora desejados, o que permite ter uma ideia geral das implicações monetárias, ocupacionais e territoriais mínimas que o projeto, para bem servir as intenções da sua construção, tem de seguir; ao que se segue a análise da geometria (interna) da sala que condicionará o campo sonoro, em que se verificarão possíveis princípios geométrico-acústicos que auxiliem na composição da forma da sala, bem como as implicações acústicas de várias soluções geométricas no balanço desejado entre aquilo que são os requisitos acústicos, funcionais, ocupacionais e organizativos, e visuais; continuando com o estudo das varandas e dos camarotes, e a sua relação com o resto da sala; seguindo com as considerações sobre a materialidade; e culminando, por fim, nos palcos, explorados não só como mais uma parte da sala que tem de corresponder às expectativas dos espectadores, mas também como espaço individual que tem de responder aos requisitos particulares da ação dos músicos. Para uma maior fruição, algumas das salas neste contexto analisadas serão ainda colocadas no capítulo posterior num âmbito histórico musical que permita entender certos requisitos musicais de cada repertório em relação com os campos sonoros que a arquitetura pretende satisfazer. Este

---

<sup>59</sup> Em particular nas grandes salas de concerto, embora, por vezes, outras tipologias de auditório sejam referidas

método de análise que se estende por estes dois capítulos possibilita a apropriação de conhecimento prático aplicável de forma integrada no desenho arquitetónico, sendo que, deste modo, culmina aqui o objetivo deste trabalho.

### **6.1. Características subjetivas Gerais do ambiente acústico**

Quando se está perante um projeto de uma sala de concertos é, face ao que se referiu anteriormente, necessário ter uma ideia do tipo de repertório ao qual a mesma se destina, pois as características do ambiente acústico requisitado podem ser distintas. Poderá ser visto no capítulo seguinte que diferentes tipos de espaço foram evoluindo em resposta à evolução repertorial<sup>60</sup>. Os pequenos grupos de Música de Câmara têm de adaptar muito bem a sua performance ao se depararem com espaços altamente reverberantes, e podem mesmo ter de abrandar o *tempo*, o que não proporciona a mesma sensação musical que o compositor pretendeu e, mais importante, que a música em si, adquirindo na sua manifestação independência de tudo o que lhe deu origem, pede para dar.

Dentro dos recintos para a performance musical, Beranek (2004) distingue pelo menos três tipos principais: a ópera, a sala de recitais e a sala de concertos. Na mesma obra é mencionada a importância de cada cidade ter uma sala para cada propósito, incluindo as atividades de palestras e conferências, mas sabe-se que nem sempre a economia ou a gestão territorial o permite, optando-se, muitas vezes, por um outro tipo de recinto que sirva todas as funções, o que, muitas vezes, acaba por não satisfazer em pleno os requisitos de nenhuma delas, embora hoje em dia seja possível recorrer a técnicas de adaptação acústica conseguindo-se bons desempenhos para diversas performances.

Long (2006, p. 657), enumera uma série de requisitos que o ambiente acústico providenciado pela arquitetura deve satisfazer:

- 1. The audience should feel enveloped or surrounded by the sound. This requires strong lateral reflections with a significant fraction of the energy arriving from the side.*
- 2. The room should support instrumental sound by providing a reverberant field, whose duration depends on the type of music being played. A reverberation time that rises with decreasing frequency below 500 Hz yields a beneficial sense of musical warmth.*

---

<sup>60</sup> Os espaços não evoluíram como fruto exclusivo da evolução dos repertórios, bem como estes últimos também têm no seu motivo existencial causas que extravasam as influências por parte da arquitetura. Não obstante, é evidente a relação entre os desenvolvimentos de ambos

*3. There must be clarity and definition in the rapid musical passages so that they can be appreciated in detail. This requires reflections from supporting surfaces located close to the source or receiver so that the initial time delay gap is short.*

*4. Sound must have adequate loudness that is evenly distributed throughout the hall. When the number of seats becomes excessive ( above 2600 seats), loudness and definition are reduced. In small auditoria the loudness must not be overbearing.*

*5. A wide bandwidth must be supported. Musical instruments generate sounds from 30 Hz to 12,000 Hz, which is much broader than the speech spectrum. The room must not color the natural spectrum of the music.*

*6. Noise from exterior sources and mechanical equipment must be controlled so that the quietest instrumental sound can be heard. Background noise levels should not exceed NC 20 in small halls and NC 15 in large concert halls.*

*7. The detailed reverberation characteristics of the space should be well controlled with a smooth reverberant tail and no echoes, shadowing, coloration, or other defects. 658 Architectural Acoustics.*

*8. The performers should have the ability to hear each other clearly and to receive from the space a reverberant return that is close to that experienced by the audience.*

## **6.2. Volume e Lotação**

Sabendo a variedade repertorial que a sala irá, na maior parte das vezes, acolher, pode definir-se um tempo médio de reverberação, sendo que para aquela (variedade repertorial) que caracteriza o uso das salas nos dias de hoje, é preferível preparar-se um volume e densidade de plateia que permitam um tempo de reverberação considerável, a partir, aproximadamente, dos 1,7 s e até os 2,1, valores que podem ser reduzidos em caso de necessidade, através da integração de sistemas flexíveis como superfícies giratórias alternáveis em absorção e difusão, etc... A escolha do RT implica, portanto, o volume da sala e o número de lugares, que, por sua vez, implicam a força sonora.

Supondo que um RT de 2 segundos é o pretendido, a segunda etapa é escolher-se é o volume (o desejado ou o permitido pelo programa de construção), ou em alternativa, a lotação, ou ainda a força sonora. Se o programa for flexível em termos de recursos dimensionais, então pode

definir-se a força sonora, a qual, segundo os ensaios apresentados em Beranek (2004), varia entre 2 e 5 dB nas melhores salas (de entre uma amostra considerável na calibração europeia)<sup>61</sup>.

Se se escolher 3 dB, pode ver-se, pelo gráfico apresentado em Beranek (2004) (fig.6.1), que a este valor corresponde a área acústica total ( $S_T$ )<sup>62</sup> de 1750m<sup>2</sup>. Retirando os 180m<sup>2</sup> atribuídos à área da orquestra ( $S_o$ ), resulta uma área acústica da plateia ( $S_A$ ) de 1570 m<sup>2</sup>. Dividindo 1750 por 0.645 (área confortável por pessoa), conclui-se que são possíveis 2434 lugares, sendo que, se mais for desejado, o  $G_{mid}$  eleito sofrerá uma redução, pois a energia sonora dividir-se-à por mais pessoas, e vice-versa (Beranek, 2004).

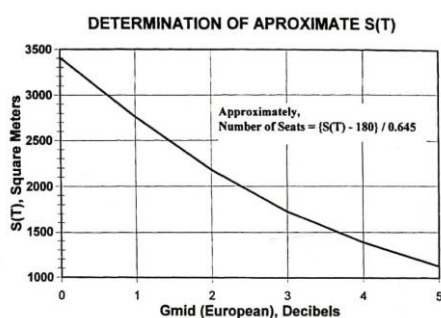


Fig. 6.1 –Determinação da área acústica total (Beranek, 2004)

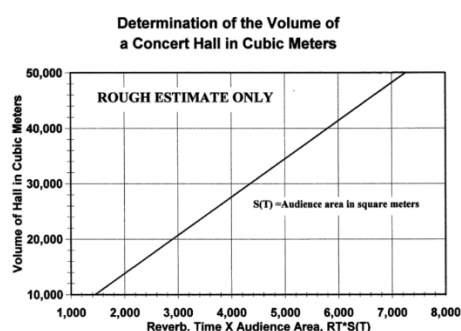


Fig. 6.2 –Determinação do volume (Beranek, 2004)

Um outro gráfico (fig. 6.2) permite obter o valor volumétrico que satisfaz as condições anteriores. Multiplicando o RT por 1750 m<sup>2</sup>, obtém-se 3500, aos quais correspondem 25 000 m<sup>3</sup> de volume.

Em observância às considerações de Long (2006), conclui-se que estes são valores de uma sala de dimensão bastante audaciosa, pois que ele sugere que o número de lugares deve limitar-se ao intervalo de 1700 a 2600 lugares, considerando que as melhores salas estão à volta dos 1850. Ver-se-à adiante que, quando a lotação se aproxima dos 3000 lugares, a arquitetura tem de tornar-se mais complexa (Barron, 2009; Long, 2006).

<sup>61</sup> Beranek (2004) menciona duas linhas de ensaios caracterizadas por diferentes métodos de calibração das fontes omnidirecionais utilizadas para o estudo. O intervalo de 2 a 5dB caracteriza a qualidade acústica das melhores salas em termos da força sonora, segundo os ensaios com a calibração europeia

<sup>62</sup> A área acústica total ( $S_T$ ) abrange a projeção horizontal dos blocos de assentos da plateia ( $S_a$ ) mais a área de tiras de 0.5m de largura colocadas à volta de cada bloco de assentos da plateia (cujo resultado se designa área acústica da plateia,  $S_A$ ), exceto nos limites encostados a uma parede ou a uma varanda (pois estas tiras têm em vista simular a área lateral dos assentos), somadas à área do palco ( $S_o$ ) cujo valor máximo para efeitos de cálculo convencionou-se 180m<sup>2</sup>

É de notar que o método preliminar apresentado não conduz a soluções cujos valores finais dos parâmetros arquitetónicos e acústicos apresentados sejam absolutamente fiéis aos valores escolhidos para esta etapa de desenho. Numa fase mais avançada de projeto o valor de RT, por exemplo, já terá em conta as características de absorção da sala que irão modificar o valor inicial escolhido, desprovido de tais considerações. No entanto, para começar o desenho é importante saber as implicações acústicas gerais resultantes de cada passo projetual e, para isso, este procedimento preliminar é de extrema importância.

### **6.3. Geometria da sala e o campo sonoro**

A configuração do campo sonoro depende do modo como as superfícies da sala encaminham as reflexões. Sabe-se que as reflexões laterais são benéficas. Desse modo, deve dar-se especial atenção às paredes laterais.

Perscrutando várias soluções geométricas, pode concluir-se, quando em sobreposição com os parâmetros acústicos, que umas resultam melhor do que outras em função de características funcionais como a lotação e o volume. Às salas pequenas não estão associadas as mesmas problemáticas acústicas das salas grandes. Enquanto isso, em relação a estas últimas deve mencionar-se o dilema das primeiras reflexões, que se manifesta em todo o desenho, tanto mais quanto maior for o espaço.

Nos pontos a seguir fazer-se-ão algumas considerações a ter relativamente à configuração do campo sonoro, e ver-se-á como o som se comporta em função da geometria.

#### **6.3.1. O controlo do campo sonoro**

A primeira consideração a ter acerca da configuração de uma sala de concertos prende-se na localização da fonte. O palco tem de estar numa posição tal que as dimensões auditiva e visual identifiquem uma mesma origem do som. Posto isto, é fácil perceber que a energia do som direto tem sempre de superar a energia refletida, ou de outro modo, a localização da fonte por parte da dimensão auditiva não será convergente com a localização visual. Quanto à energia refletida, pesquisas nos últimos 60 anos, com destaque para o estudo de Beranek sobre o ITDG e de Marshall sobre as reflexões laterais, têm vindo a evidenciar que um pequeno intervalo entre a chegada do som direto e a da primeira reflexão beneficia grandemente a sensação de intimidade, e que o direcionamento lateral do som promove a sensação de espacialidade

(sobretudo na dimensão aparente da fonte). A estas duas teses deve acrescentar-se os ensaios subjetivos de Damaske (1967, citado por Barron, 2009) sobre a difusão, que indicam que para uma boa sensação de envolvimento sonoro o som não necessita de chegar ao espectador de todos os sentidos, sendo que quatro deles, distribuídos, são suficientes. Em relação a esta última premissa deve ter-se em mente, face ao que já foi referido, que os níveis sonoros da energia proveniente das diversas direções devem ser controlados de modo a não causar falsa localização da fonte ou outros fenómenos indesejados. Deste modo, as paredes traseiras devem ser tratadas com elementos absorventes, para que não surjam ecos na audiência nem no palco, e as paredes laterais devem ser tratadas com elementos difusores, não necessariamente a cobrir a toda a superfície, mas que permitam que o campo sonoro por elas direcionado não seja fruto de reflexões especulares que possam causar falsa localização da fonte, encandeamento acústico e mesmo ecos.

Em Barron (2009) são estudados os efeitos subjetivos associados a uma reflexão isolada que varia em intensidade e atraso em relação ao som direto. Este estudo é considerado como um possível ponto de partida para o entendimento da experiência subjetiva relativa à resposta da sala ao impulso (fig.6.3).

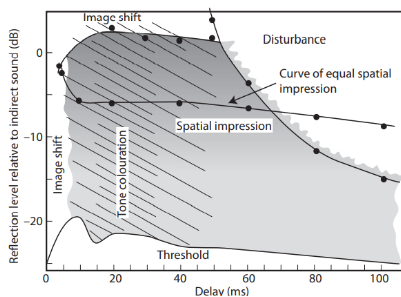


Fig. 6.3 –Sensações sonoras associadas a uma única reflexão, de ângulo azimutal de 40°, variável em atraso e intensidade relativamente ao som direto (Barron, 2009).

## 6.3.2.Desenho das primeiras reflexões

### 6.3.2.1 Acústica Geométrica

As primeiras reflexões podem ser estimadas com base na Acústica Geométrica. A técnica desta disciplina consiste em prever a direção da reflexão uma vez sabido o ângulo de incidência na superfície em estudo. Maquetes óticas podem ser usadas, tirando partido de raios de luz incidentes em espelhos a simular as ondas sonoras (Rooth, 2017). No entanto, nestas simulações é ignorado o comprimento de onda que, se for grande (frequências baixas), terá tendência a difratar ao encontrar uma superfície mais pequena. Se a mesma onda (de comprimento maior

que a dimensão da superfície) encontrar uma aresta um diedro, não tem caminho para difratar, refletindo- se, mas não no sentido esperado (fig. 6.4)



Fig. 6.4 – À esquerda, a onda sonora tem comprimento menor que o tamanho da parede, dando origem a uma reflexão especular. À direita, o comprimento de onda é maior que o tamanho da superfície em que incide, tendendo a difratar (seta a tracejado). No entanto, como a superfície é adjacente de outra, formando um diedro, a onda vai refletir- se, mas não no sentido esperado (figura elaborada pelo autor)

Para além da difração, é ignorada a possibilidade de qualquer campo difuso (Carrión Isbert, 1998).

De um modo geral, e como as dimensões da maior parte das salas de concerto aqui tratadas são grandes, não deve haver problemas de difração (por vezes as pequenas salas de recitais têm problemas desta ordem com as baixas frequências). Em todo o caso a acústica geométrica permite ter uma ideia geral de como a geometria conduz o campo sonoro, o que é de grande relevância, pois que, mesmo que os elementos de difusão e absorção presentes na sala real façam alguma diferença na configuração do campo sonoro (em comparação com o estudado por meio dos modelos da acústica geométrica), o conjunto arquitetónico torna- se mais eficiente se a geometria direcionar adequadamente o som. Pelo contrário, em salas em que a forma não é benéfica, o conseqüente gasto económico nesses elementos tem de ser muito maior e, por vezes, sem os resultados pretendidos.

### 6.3.2.2. Técnica da Elipse

Em Barron (2009) é descrita uma técnica para a composição, em salas muito grandes, das superfícies associadas às primeiras reflexões, em função da direção e atraso máximo desejados. O atraso máximo pode ser controlado através do desenho de uma elipse que contenha como focos a fonte e o receptor<sup>63</sup>. Uma vez que o controlo assenta na dimensão da elipse, para que esta se determine, pode tirar-se partido da simplicidade explicativa característica da reflexão especular, traçando-se uma superfície tangente à elipse, cujo ponto de contacto determina o ponto de incidência da única onda cujo caminho caracteriza o atraso desejado. Se, depois de determinada a dimensão da elipse, a superfície for secante, então as reflexões<sup>64</sup> a ela associadas não ultrapassarão o atraso limite (fig. 6.5).

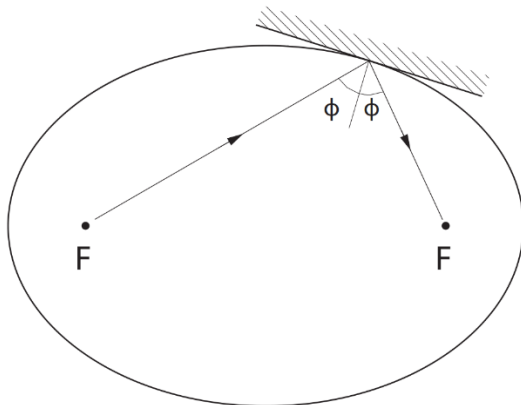


Fig. 6.5 – Técnica da elipse, com vista ao encaminhamento otimizado das primeiras reflexões por parte da envolvente (Barron, 2009)

A dimensão do refletor determina a faixa de frequências possíveis de refletir.

No pós-guerra surgiu a necessidade de construção de salas maiores e com formas que acolhessem mais larga audiência, sendo que toda ela deveria estar a uma distância aceitável do palco. Este facto conduziu a problemáticas como a dificuldade em encaminhar a energia sonora de modo equilibrado para todos os lugares e com o mesmo atraso, ou pelo menos dentro dos 80 ms aceitáveis que, uma vez ultrapassados, contanto que com muita força, o ambiente acústico torna-se desconfortável. As soluções assentam na aplicação de elementos difusores e absorventes, e na composição adequada da envolvente, para a qual este modelo se torna útil (fig. 6.6) (Barron, 2009).

<sup>63</sup> Como a soma das distâncias de cada foco a qualquer ponto de tangência é sempre a mesma, então cada elipse, ou melhor ainda, cada elipsoide (elipse em rotação sobre um dos seus eixos) corresponde a um certo atraso das primeiras reflexões

<sup>64</sup> A aplicação desta técnica surge no contexto do controle direcional e temporal da energia que caracteriza as primeiras reflexões (até cerca de 80ms após o som direto)

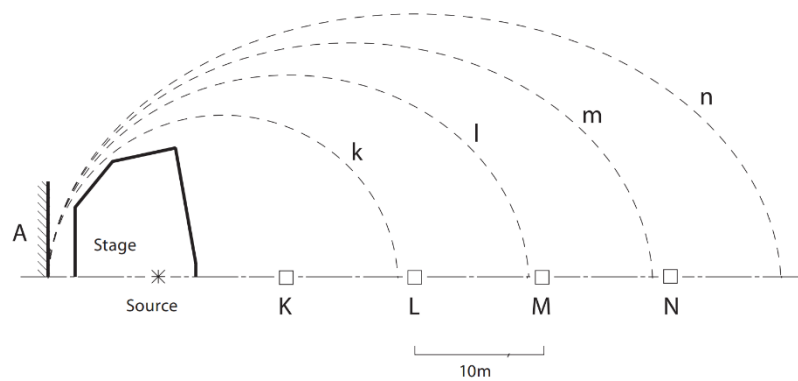


Fig. 6.6 – Técnica da elipse aplicada no desenho de uma sala (meia planta). As elipses traçadas são dimensionadas de modo que, para a área que contêm, as reflexões cheguem com um certo atraso máximo. As superfícies refletoras devem ficar dentro de cada elipse (Barron, 2009)

A composição arquitetónica do De Doelen Concert Hall pode ser derivada deste modelo (fig.6.30).

A outra opção de posição de refletor que pudesse servir todos os lugares seria atrás do palco, mas é um risco, porque como fica muito perto dos músicos, pode favorecer alguns naipes instrumentais, provocando aquilo a que se chama coloração de tom. Esta solução foi aplicada na Salle Pleyel, em Paris, 1927, e no London Royal Festival Hall, em 1951, entre outros. Era uma técnica usada nos anos 50, mas hoje em dia já não (Barron, 2009). As primeiras salas em terraço, em 1963, introduziram o uso das paredes refletoras perto dos assentos (Barron, 2009, p. 50), o que é uma grande vantagem, pois as primeiras reflexões laterais são muito importantes para as sensações de intimidade e de espacialidade.

### 6.3.3. Forma

A forma que a arquitetura dá ao espaço reflete-se na “forma” do campo sonoro. Por isso é importante saber a configuração que para ele se deseja. Na história das salas de ópera e de concerto, distinguem-se quatro plantas base (fig. 6.7), ainda que não tenham esgotado a panóplia de geometrias existentes (Barron, 2009; Long, 2006).

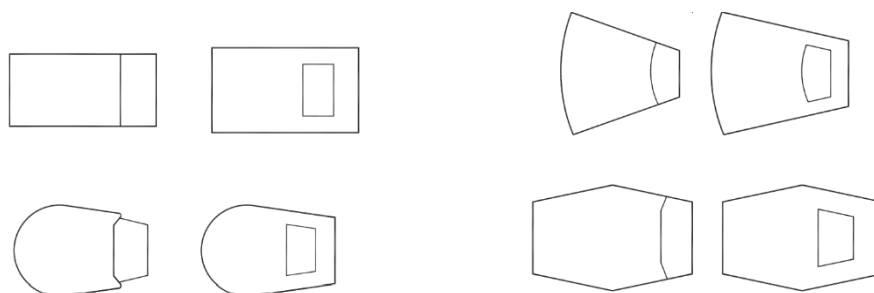


Fig. 6.7 – Geometrias base caracterizadoras da história das salas de concerto (adaptada de Long, 2006)

A forma afeta diretamente as sensações subjetivas de intimidade, espacialidade, calor, clareza, textura e outros. Mas porquê? Quais as consequências de cada solução geométrica?

#### 6.3.3.1. Salas retangulares

Na história das salas de concerto a forma retangular demonstrou um sublime carisma acústico para dimensões moderadas e, não obstante a simplicidade geométrica, comprovou também ser capaz de aliciar o sentido visual. As salas clássicas como Musikvereinsaal, Boston Symphony Hall e outras são a prova materializada de tal apreciação. A herança arquitetónica conceitual deixada pelos salões de baile palacianos conduz a proporções que se comprovaram adequadas (2:1:1) nas novas salas do século XIX, bem como a uma ornamentação rica que providencia um campo difuso envolvente (Barron, 2009).

Neste tipo de geometria as reflexões são sem esforço conduzidas lateralmente ao espectador, o que justifica a sensação espacial de que a fonte tem uma dimensão maior que o visualmente observável, e a estreita largura da sala providencia uma forte sensação de intimidade (o que se expressa nos valores de ITDG). As já referidas Boston Symphony Hall (ver figuras na secção secção 7.4.3.3) e Musikvereinsaal de Viena (ver figuras na secção 7.3.3.1), bem como a Concertgebouw em Amsterdão (figs. 6.8 e 6.9) são por muitos consideradas as melhores salas do mundo. A sala de Amsterdão tem uma particularidade no que diz respeito às proporções típicas

das salas clássicas. Esta sala é mais larga, facto que lhe dá um carisma muito próprio pois, a despeito de a sensação de intimidade se perder um pouco em relação ao que acontece nas outras duas salas, a sensação de envolvimento pelo som reverberante é muito apreciada<sup>65</sup> (Beranek, 2004).



Fig. 6.8 – Concertgebouw, Amesterdão. Perspetiva do interior (Classictic, 2020)

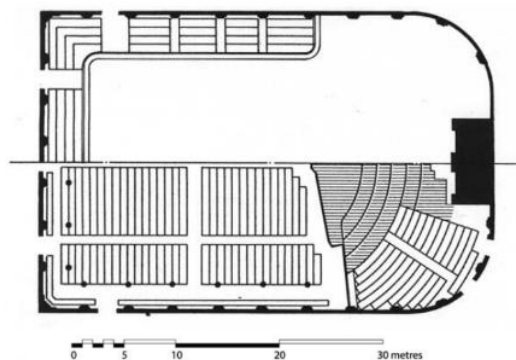


Fig. 6.9 – Concertgebouw, Amesterdão. Planta integral do piso principal e da varanda (Barron, 2009)

Como já foi referido, a forma retangular é uma excelente solução arquitetónica para audiências pequenas ou moderadas, no entanto, para audiências aproximando-se das 3000 pessoas, as proporções ideais (da sua concretização em três dimensões, paralelepípedo) têm de ser distorcidas, ou em comprimento, ou em largura, ou em altura. Se o comprimento ultrapassar os 40 m, os lugares de trás não têm uma adequada linha de visão para o palco, e a energia sonora torna-se mais fraca. Se esta solução alongada estiver no motivo da integração de uma varanda profunda, os assentos cobertos do piso principal sofrem da falta de energia reverberante, prejudicando a sensação de envolvimento, para além de que, se a varanda não estiver alta o suficiente, até o som direto pode ter dificuldade em alcançar as filas mais traseiras do pavimento inferior. Em contrapartida, se a largura for aumentada, as sensações de intimidade e clareza perdem-se, sobretudo no centro da sala, pois as reflexões laterais percorrem uma maior distância, perdendo energia. Resta, portanto, aumentar a altura, enquanto se acrescentam varandas, o que também tem as suas desvantagens, visto que a reverberação pode aumentar demasiado, em detrimento da clareza ou, se a altura das salas não for suficientemente aumentada, o reduzido espaço vertical entre as varandas impede que o som reverberante vindo

<sup>65</sup> Nem sempre um rico campo reverberante compensa o largo atraso entre a chegada do som direto e da primeira reflexão. Neste caso do Concertgebouw, o valor de ITDG é de facto mais alto que o verificado nas outras duas salas, perfazendo 21 ms, em comparação com 12 e 15ms nas salas de Viena e de Boston, respetivamente. No entanto, 21 ms é ainda um bom valor de ITDG, o que corrobora as críticas positivas do ambiente acústico

de cima chegue aos assentos do pavimento inferior, o que prejudica a sensação de envolvimento.

Russell Jonhson e a sua empresa Artec Consultants adotaram a estratégia de aumentar a altura para a McDermott Concert Hall em Dallas<sup>66</sup>, embora também se verifique que a sala tem uma largura considerável. Beranek (2004) descreve o ambiente acústico e visual com positivismo, a despeito de um certo desequilíbrio sonoro em relação ao conjunto orquestral percetido em lugares ao lado da orquestra. No entanto, é de referir que esta sala integra na sua arquitetura dispositivos extra de controlo acústico, como câmaras de reverberação e canópio regulável em altura (fig. 6.10).

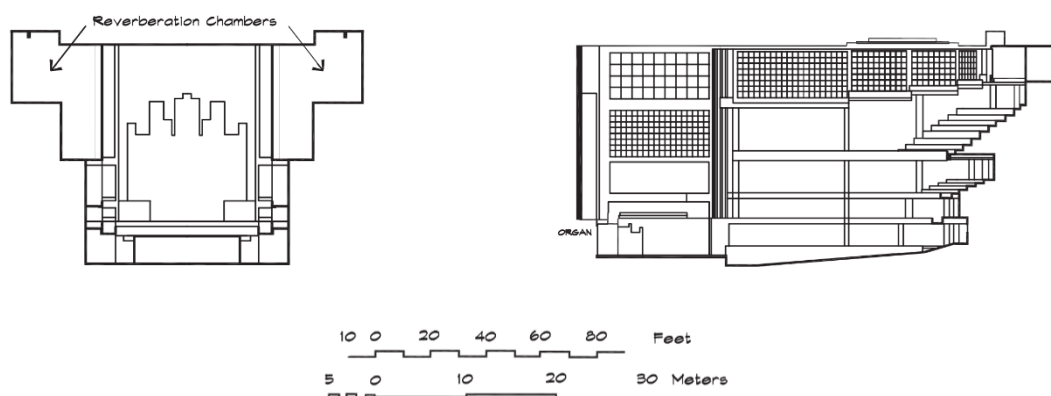


Fig. 6.10- McDermott Concert Hall, Dallas. Corte transversal (à esquerda) e corte longitudinal (à direita) ( Long, 2006, de Beranek, 1996)

Uma outra opção para o acolhimento de grandes audiências em salas retangulares, mas não muito viável nos tempos modernos (em que a dimensão ergonómica foi incrementada), seria reduzir a área ocupada por pessoa, comprimindo os lugares, como em Boston Symphony Hall.

Ver-se-á adiante que para salas maiores há soluções geométricas mais flexíveis e eficazes.

### 6.3.3.2. Salas curvas

O dilema da forma curva acontece com as superfícies côncavas. No entanto, estas últimas, ao invés de causarem focalizações, podem ajudar a dispersar a energia, o que depende da distância

<sup>66</sup> Esta sala de 1989, com 2065 lugares e três níveis de varandas, é um resultado geométrico de uma mistura do retângulo da sala de concerto clássica e da ferradura da sala de ópera

aos lugares. Para os lugares fora da circunferência à qual pertence a projeção da superfície côncava, esta ajuda a dispersar a energia (contanto que a fonte sonora também esteja fora dessa circunferência), caso contrário, a indesejável focalização tem grandes hipóteses de acontecer, a menos que absorventes acústicos sejam aplicados na parede, ou ainda elementos difusores, embora Barron (2009) alerte para o facto de que nem estas soluções remediadoras eliminam por completo a possibilidade de a superfície refletir energia de níveis altos (fig.6.11) (Barron, 2009).

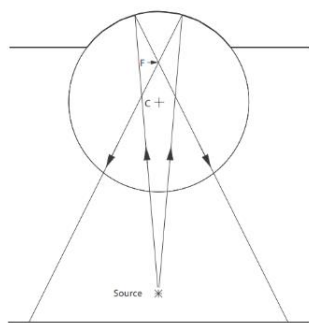


Fig. 6.11- Efeitos das reflexões de superfícies côncavas, fora e dentro da circunferência à qual pertence a projeção da superfície (Barron, 2009)

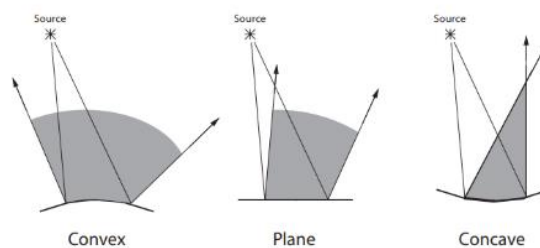


Fig. 6.12- Fenómenos de reflexão associados a superfícies convexas, planas e côncavas (Barron, 2009)

Por sua vez, a superfície convexa dispersa o som sem risco de focalização (fig. 6.12) (Barron, 2009).

Verificados os prós e os contras, conclui-se que as formas curvas devem ser aplicadas com cautela, podendo contribuir para uma excelente acústica, ou pelo contrário, causar o caus.

### **a) A forma em ferradura**

Como se verá no próximo capítulo, os primeiros espaços construídos com propósitos musicais eram curvos, mais precisamente em forma de ferradura. Eram construídos para as apresentações de ópera, já que os concertos propriamente ditos (só música) apenas se popularizaram mais tarde (Michels, 2007).

Quando estas “pequenas óperas” (eram de facto pequenas, e, quando os lugares mais afastados distavam da frente do palco cerca de 30 m já apresentavam problemas relativamente à visão<sup>67</sup>)

<sup>67</sup> Para as linhas de visão serem boas, o que é impreterível em salas de ópera, a última fila não deve distar mais de 20 m do palco

são aumentadas para que o RT se adeque a concertos sinfónicos, tornam-se pouco recomendáveis, pois é provável que focalizações sonoras aconteçam, tanto com foco na plateia quanto no palco, o que não é recomendável.

Barron (2009) refere que esta forma promove pouco a textura acústica<sup>68</sup>. Em relação a outros parâmetros, deve mencionar-se que a acústica no piso principal é mais viva que nos camarotes, nos quais o som fica um pouco camuflado, tanto mais quanto mais para trás os espectadores estiverem e pequena for a abertura (em contraste com o que acontece nas entradas, nas quais é possível usufruir-se da força do som direto e de algumas reflexões) (Beranek, 2004). O teatro de São Carlos desenvolve-se sobre esta conceção formal (fig.6.14).



Fig. 6.14- Teatro de São Carlos (Nogueira, 2015)

Se a percentagem da superfície aberta (pelos camarotes) for muito elevada, a sensação de intimidade também fica um pouco perdida, bem como a sensação de que a dimensão da fonte sonora aumenta.

A sensação de envolvimento sonoro está relacionada com a difusão. O espectador deve ficar imerso em energia sonora. Uma sala que promova uma boa difusão tem de ter uma combinação adequada entre a geometria e os elementos difusores ou ornamentos. Neste tipo de salas (em ferradura), embora as primeiras reflexões não propiciem uma boa textura (devido à irregularidade temporal entre elas), a geometria em que se encerram e se transformam em cauda reverberante, associada ao carácter ornamental típico destes espaços, é adequada a uma boa sensação de envolvimento musical.

Visto o conjunto dos parâmetros, conclui-se que esta forma em particular, a ferradura, não é apropriada a concertos sinfónicos, para o que basta comparar-se as proporções de um sala

---

<sup>68</sup> Possivelmente porque as ondas encontram muitos vazios (dos camarotes), o que não permite que elas cheguem com intervalos de tempo constantes

clássica de ópera e de uma (clássica) de concertos. As proporções são bastante diferentes, o que evidencia ainda mais a desapropriação de uma aos propósitos da outra (figs. 6.15).

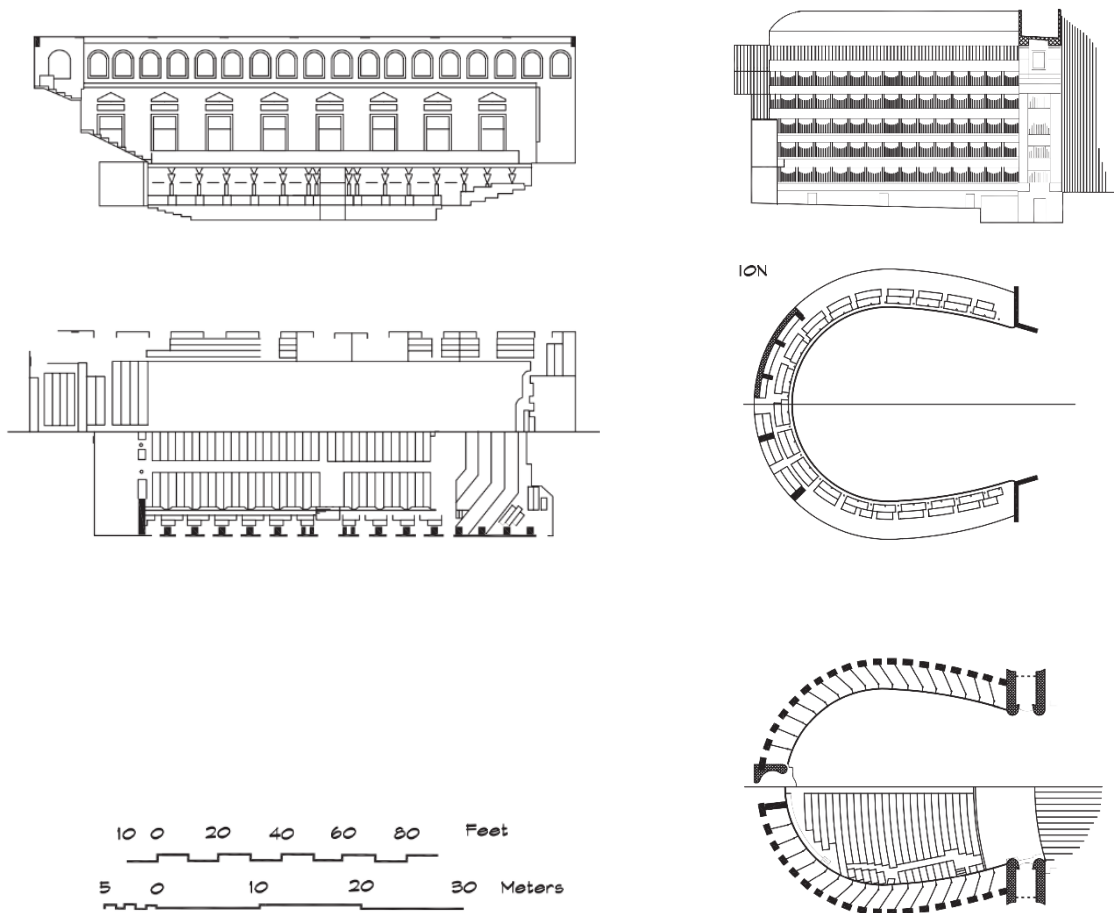


Fig. 6.15- Proporções de uma sala clássica de concertos (à esquerda) em comparação com as proporções de uma sala clássica de ópera (à direita) (Long, 2006, de Beranek, 1996)

### 6.3.3.3. A forma em leque

Depois da primeira guerra mundial, o movimento moderno que aboliu as ornamentações e que esteve na origem das salas direcionais como a salle Playel, veio junto com o advento da afirmação do cinema. As salas de cinema, de modo que a capacidade fosse grande, adotaram a forma dos teatros gregos, em leque. Logo as salas de concerto começaram a ser construídas com base nessa geometria. Não tardou até que muitos engenheiros acústicos lhe ganhassem aversão, pois que, não obstante a sua apelativa estética visual, e a comprovada eficácia como sala de cinema ou teatro ao ar livre (como os da antiga Grécia), não é a que melhor se adequa a concertos, piorando à medida que as dimensões aumentam (Barron, 2009).

Começando pela parede traseira, curva, com grande probabilidade de concentrar o foco das reflexões em pontos preferenciais em detrimento de “vazios sonoros” noutros pontos do recinto (as focalizações podem ser suprimidas com a aplicação de material absorvente acústico), seguem-se os problemas originados pela distância alcançada pelas paredes laterais, que se torna demasiado grande à medida que os lugares são mais próximos do fundo da sala e do eixo central, sendo que para esses, o atraso da primeira reflexão em relação ao som direto torna-se consideravelmente grande, prejudicando a sensação de intimidade. Do mesmo modo, as reflexões posteriores não chegam com suficiente energia, tampouco lateralmente (fig.6.16), o que é ressentido em termos de textura e na sensação espacial, tanto no envolvimento, que está relacionado com o som tardio, quanto no aumento aparente da dimensão da fonte, mais relacionado com as primeiras reflexões (fig. 6.17) (Barron, 2009).

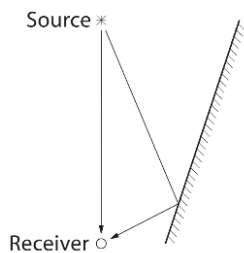


Fig. 6.16- Reflexão de uma superfície constituinte de uma sala em leque (Barron, 2009)

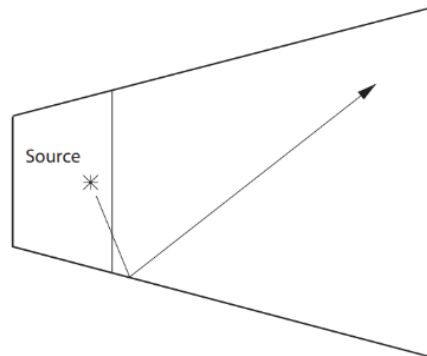
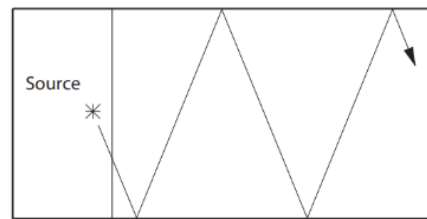


Fig. 6.17- Direcionamento lateral do campo sonoro numa sala retangular em comparação com o direcionamento numa sala em leque (Barron, 2009)

Barron (2009, p. 95) menciona os testes que Krokstad, Strom e Sorsdal fizeram através de programas informáticos, dos quais concluíram que neste tipo de desenho em leque há uma falha de reflexões no período de tempo entre 40 e 180 ms.

Em relação às focalizações e possíveis ecos advindos da parede curva traseira, soluções como a aplicação de elementos absorventes podem ser adotadas, mas a possibilidade de ocorrência de ecos pode, ainda assim, permanecer, e nesse caso, seria ainda necessário inclinar a parede para trás, colocando isolamento no teto, ou para a frente, ou ainda aumentar a quantidade de elemento absorvente (Barron, 2009; Beranek, 2004).

O Grand Hall do Wembley Conference Centre foi das primeiras salas construídas para conferências na Grã-Bretanha. Para além de conferências também é usada para eventos desportivos, lançamentos de produto, e música popular. Os arquitetos asseguraram a sua fiabilidade para concertos orquestrais, o que, devido à sua forma, entre outros fatores, se demonstrou longe de ser certo (fig.6.18) (Barron, 2009).

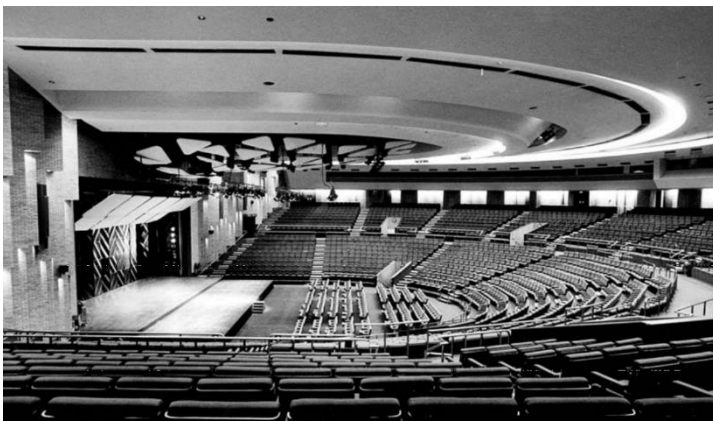


Fig. 6.18- Wembley Conference Center. Perspetiva (Barron, 2009)

Para além da elevada área acústica para uma sala com esta organização espacial, resultante num reduzido RT (1.3 s.), parte do teto é aberta para um volume superior, o que condiciona a força sonora na sala e a resposta à dinâmica da fonte (a 24 m da fonte o nível total sonoro é inferior ao critério dos 0 dB, o que significa que a sala não amplifica o suficiente a energia sonora) (figs. 6.19 e 6.20) (Barron, 2009).

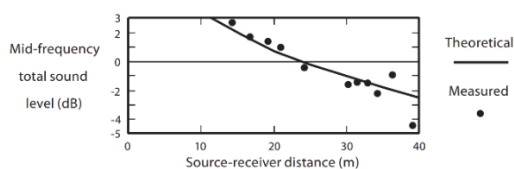


Fig. 6.19- Wembley Conference Center, força sonora nas médias frequências (Barron, 2009)

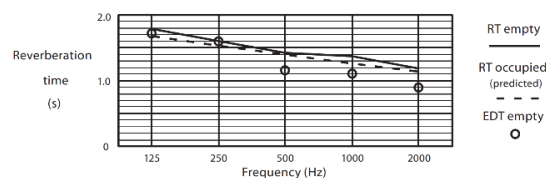


Fig. 6.20- Wembley Conference Center, tempo de reverberação (Barron, 2009)

A sala, cujo ângulo é cerca de 180 graus, tem como principal superfície para as primeiras reflexões o teto (fig.6.21). A parede de trás foi transformada com características difusoras, e ao que parece, com sucesso, pois, pelo menos o palco não é afetado por ecos. As paredes frontais estão muito longe da maior parte dos lugares da sala, para além de que não estão na posição mais favorável em relação à diretividade dos instrumentos, o que significa que até os espectadores que dela estão próximos recebem pouca energia lateral. Este facto afeta tanto as primeiras reflexões (no atraso e na intensidade) quanto o som reverberante<sup>69</sup> (figs. 6.21 e 6.22), e portanto as sensações de intimidade e de espacialidade são muito prejudicadas. A clareza atinge valores objetivos altos, o que não é de surpreender, visto que a energia reverberante é extremamente fraca (fig.6.23) (Barron, 2009).

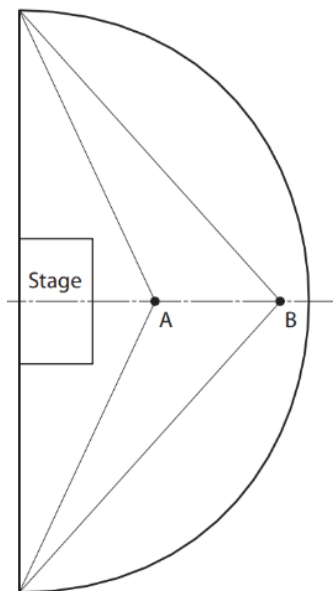


Fig. 6.21- Ângulo das reflexões tardias numa sala em leque com 180° de abertura (Barron, 2009)

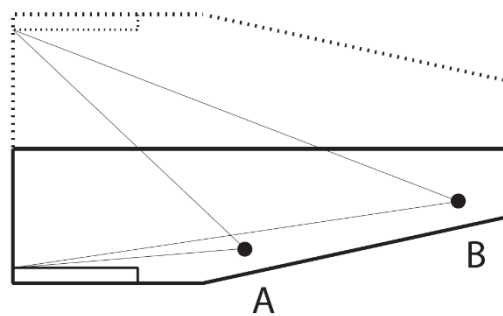


Fig. 6.22- Reflexões do teto (Barron, 2009)

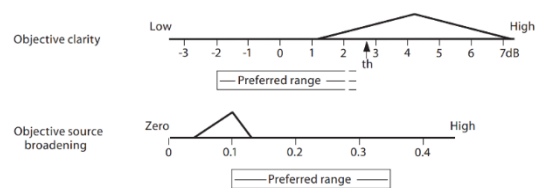


Fig. 6.23- Wembley Conference Center, valores objetivos de clareza e dimensão aparente da fonte (Barron, 2009)

<sup>69</sup> Facto que vai de encontro aos resultados dos testes de Krokstad, Strom e Sorsdal (1968, citado por Barron, 2009)

Pode ver-se, por meio da técnica da acústica geométrica IMS, que o conjunto dos caminhos das reflexões na sala se torna cada vez menos homogêneo, à medida que o ângulo de abertura do leque aumenta<sup>70</sup> (fig.6.24) (Barron, 2009).

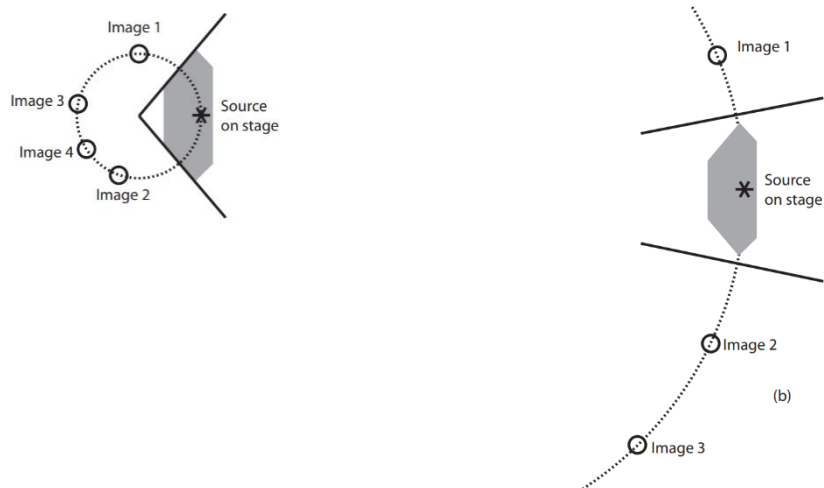


Fig. 6.24- Demonstração, pela técnica IMS, do Grau de homogeneidade do campo refletido em função do ângulo de abertura da sala em leque (Barron, 2009)

#### 6.3.3.4. A forma em elipse

Em resposta à maior afluência de público, as salas da segunda metade do século XX tiveram de aumentar. As soluções de desenho não podiam assentar no simples aumento das salas retangulares como havia ocorrido na passagem dos salões de baile palacianos para as primeiras grandes salas de concerto. Estas novas salas tinham de ser ainda maiores, e formas retangulares para mais do que 2000 pessoas, ou ficam muito compridas e os lugares da parte de trás ficam exageradamente afastados do palco, ou muito largas, prejudicando a chegada de reflexões aos lugares do meio e comprometendo a capacidade do palco responder às necessidades dos músicos em se ouvirem para poderem tocar em conjunto; ou ainda muito altas, constituindo um dilema entre o tempo de reverberação e a distância vertical entre as varandas. Como alternativa surgiram novas soluções tipológicas baseadas numa disposição em que o palco fica rodeado de plateia, para que mais pessoas possam ficar a uma boa distância da orquestra. A despeito da

<sup>70</sup> Uma sala em leque muito aberto conduz àquilo que, em expressão da língua Inglesa, se chama “narrow image source”, ou seja, as imagens espelhadas da fonte, as quais indicam os caminhos das reflexões de diversas ordens, são muito próximas umas das outras, e, conseqüentemente, também esses mesmos caminhos estarão contidos em zonas estreitas da sala, prejudicando a acústica no geral do espaço

possibilidade das salas retangulares também poderem ter uma organização espacial semelhante, outras formas como, por exemplo, a elipse e o hexágono, demonstraram-se particularmente flexíveis e eficientes (Barron, 2009).

As soluções arquitetónicas que adotaram a forma em elipse têm a particularidade de, para além de acolher maior número de pessoas, fazer parecer ao espectador que esteja sentado num foco perto da parede que a sala é redonda, o que causa a ilusão de se estar mais perto do palco (Barron, 2009). No entanto, o desempenho acústico de tal geometria é desastroso, facto que pode ser contrariado através da integração de superfícies modeladas de forma a direcionar o som para a audiência, como muito bem ilustra Town Hall Christchurch, na Nova Zelândia<sup>71</sup> (figs.6.25 e 6.26).

A elipse foi impedida de causar ecos através da integração de painéis dispostos em cada galeria, bem como do tratamento com elementos absorventes nas superfícies de intervalo entre os assentos e os painéis. A descontinuidade da superfície formada pelos painéis e o dimensionamento dos mesmos contribui mais ainda para esse efeito anulador, uma vez que as ondas sonoras encontram mais irregularidades. A inclinação dos limites das varandas propicia o encaminhamento do som para o piso principal e para o palco, e debaixo destas os assentos são servidos pela inclinação do intradorso (figs. 6.27) (Barron, 2009; Beranek, 2004).

O envolvimento sonoro pela cauda reverberante não é tão marcado nesta sala como naquelas clássicas, mas, em contrapartida, o espectador sente uma envolvimento pela energia das primeiras reflexões (textura). A clareza da sala é boa, apesar de o tempo de reverberação ser longo, 2,3 s (Barron, 2009, p. 112), facto que é corroborado pela diferença entre o EDT e o RT. O EDT corresponde a apenas 82 % do RT nas frequências médias, o que significa que o decaimento inicial do som é mais rápido, talvez por haver grandes vazios entre as superfícies refletoras por onde o som se “escapa”, bem como por estas refletirem o som diretamente para a audiência que logo o absorve. Neste e noutros casos em que o EDT é mais baixo, um alto RT é necessário para que a sensação da reverberação não se perca (Barron, 2009; Beranek, 2004).

Os outros parâmetros acústicos, no geral, promovem uma boa experiência musical mas, mais uma vez, isto não acontece devido à acústica de que a geometria elíptica só por si se apropria, mas antes pela integração de elementos que, direcionando adequadamente o som,

---

<sup>71</sup> Este caso torna-se exemplar na medida em que a sábia coordenação com que se integraram todos os elementos arquitetónicos (forma e dispositivos de controlo do campo sonoro), tendo em conta a fraca eficiência de cada um isoladamente, possibilitou que, aliado a um tremendo deslumbre visual se alcançasse um bom desempenho acústico

proporcionam uma boa intimidade (visual<sup>72</sup>e acústica), clareza, e sensação de que a sala responde aos instrumentos, como se fosse mais um.

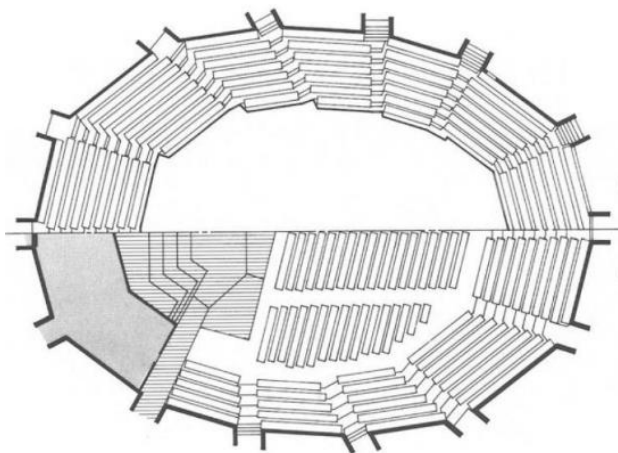


Fig. 6.26. Christchurch Town Hall, perspectiva (Barron, 2009)

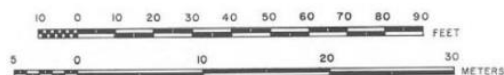
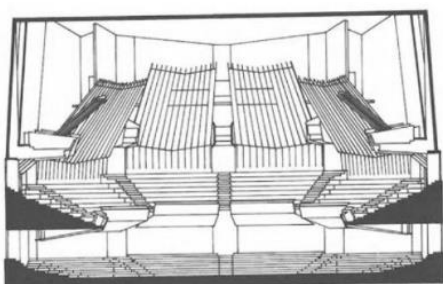
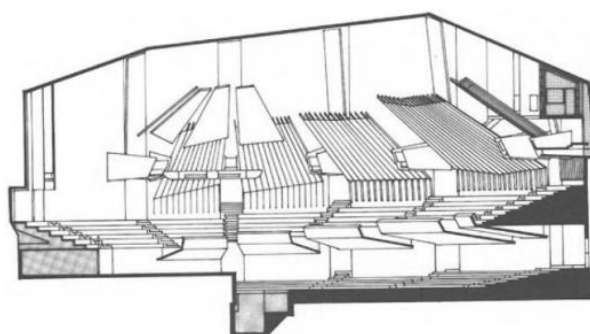


Fig. 6.25. Christchurch Town Hall, planta e cortes (Beranek, 2004)

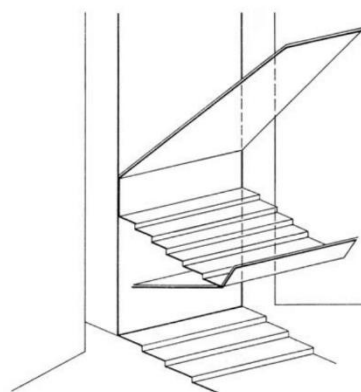


Fig. 6.27. Christchurch Town Hall, superfícies refletoras em cada galeria (Barron, 2009)

<sup>72</sup> Para além da ilusão visual provocada pela forma elipsoidal, em Christchurch Hall, não há lugares que distem mais de 28 m da frente do palco, o que é benéfico em termos acústicos e visuais, se em comparação com salas cuja última fila se encontra a cerca de 40 m do palco

Já noutros tempos a elipse havia sido utilizada nos teatros romanos, mas sem este sistema de direcionamento. Também aí as demandas acústicas eram outras, tanto por o teatro ser ao ar livre, quanto pelo tipo de performances realizadas. No século XIX foi, em Inglaterra, construído um edifício de planta elipsoidal (praticamente). Não só a planta era curva, mas também o teto, que consistia numa gigante abóbada. Esta construção, o Royal Albert Hall, necessitou renovações para atenuar os efeitos de tal forma.

### 6.3.3.5. A forma hexagonal e em trapézio e as salas em terraço

Como já foi abordado no ponto anterior, os dispositivos acústico- arquitetónicos de que cada solução geométrica se utiliza para a organização espacial e do campo sonoro são muito importantes e podem conduzir mesmo a espaços elípticos com uma excelente acústica<sup>73</sup>.

Após a segunda guerra mundial, os designs das salas de concerto tornam-se cada vez mais desafiantes, tanto no seu carácter acústico quanto no deleite visual, e a complexidade geométrica, não só do “invólucro” da sala mas também do sistema organizativo, alcança soluções arquitetónicas dignas de dissertar. Isto deve-se ao facto de a audiência crescer e a disposição no interior das salas ter de corresponder a estratégias distintas das que haviam sido utilizadas até então (Barron, 2009).

Começando por observar o desempenho acústico de geometrias simples, conclui-se que a forma hexagonal é vantajosa em relação à forma em leque (Barron, 2009).

As paredes em “reverse splay” do hexágono direcionam as reflexões lateralmente, enquanto que o ângulo com que a reflexão incide no espectador (em relação ao plano imaginário que corta a cabeça longitudinalmente) numa sala em leque é muito mais aberto (fig.6.28) (Barron, 2009).

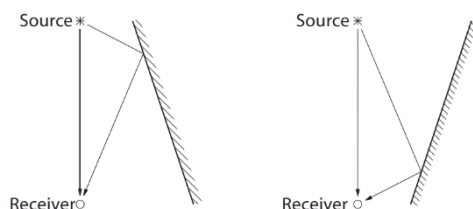


Fig. 6.28. Comparação entre o grau de lateralidade das reflexões numa superfície em “reverse- splay” (à esquerda) e o grau de lateralidade das reflexões numa superfície lateral de uma sala em leque (à direita) (Barron, 2009)

<sup>73</sup>O que seria contraditório se apenas se tivesse em consideração a forma elíptica

No entanto, à medida que as salas aumentam em dimensão, problemas surgem mesmo na forma hexagonal, pois que, apesar dos lugares mais afastados do palco serem favorecidos com as paredes em “reverse- splay”, aqueles que se encontram na metade da sala mais próxima do palco sofrem de poucas reflexões laterais. Uma hipótese para combater essa adversidade foi procurada em soluções como aquela utilizada pelos arquitetos Kraaijvanger e Fledderus e seus consultores acústicos, Kosten e de Lange, no De Doelen Concert Hall, 1966, em Rotterdão. A plateia próxima do palco e o palco são rodeados por um hexágono mais pequeno, de modo que as primeiras reflexões não chegam tão tarde (Barron, 2009; Beranek, 2004) (figs. 6.29 e 6.30).

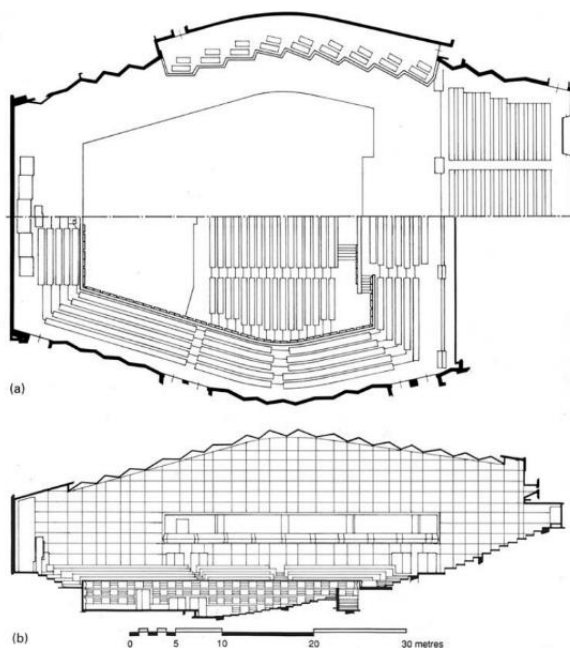


Fig. 6.29. De Doelen Concert Hall, Planta integral da segunda varanda e do primeiro piso e primeira varanda, e segunda varanda (em cima), e Corte Longitudinal (em baixo) (Barron, 2009)



Fig. 6.30. De Doelen Concert Hall, perspectiva (Gosselaar, s.d.)

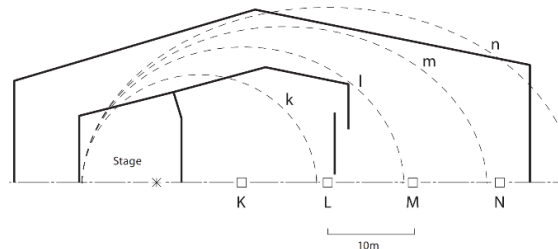


Fig. 6.31. Derivação da forma da sala De Doelen Concert Hall pelo modelo da elipse (Barron, 2009)

Esta sala pode ser estudada com base no modelo da elipse explicado na secção 6.3.2.2 (fig. 6.31) (Barron, 2009).

O potencial geométrico do hexágono em relação às reflexões laterais teve algum impacto no ideal (sobre a configuração do campo sonoro) de pesquisadores alemães dos anos 50, que

haviam atribuído o sucesso das salas clássicas ao alto grau de difusão que lhes era característico, promotor das sensações de reverberação e envolvimento. No entanto, antes de chegarem à conclusão de que o campo sonoro não tem de ser perfeitamente difuso ou uniforme<sup>74</sup> para que o espectador se sinta envolvido, priorizaram a integração de abundantes elementos difusores nas paredes e no teto, com o intuito de maximizar a difusão. Em Bonn, a sala Beethovenhalle dispõe, só no teto, de cerca de 1769 elementos difusores, constituídos por hemisferas, cilindros truncados e pirâmides (fig.6.32) (Barron, 2009; Beranek, 2004).

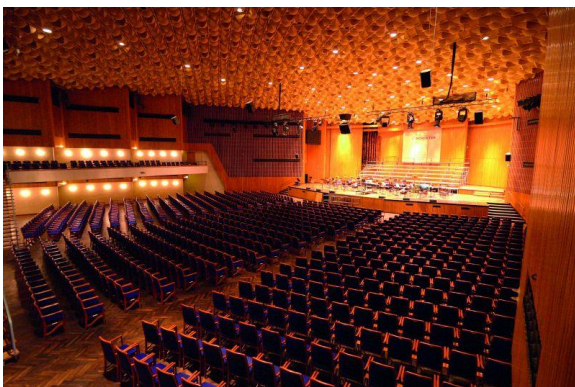


Fig. 6.32. Beethovenhalle, perspectiva (World CC Boon, 2002- 2020)

As disposições interiores das salas também tomaram o seu rumo audacioso originando espaços de sublime deleite visual e muito boa acústica, resultantes de um conceito organizativo em terraços.

As soluções arquitetónicas em terraço foram muito exploradas por Cremer. Uma obra famosa é a Filarmónica de Berlim. A organização interior da sala foi inspirada em paisagens naturais, seguindo as linhas dos vales com as suas vertentes em vinhas das mais diversas composições formais (fig.6.33 e ver figuras da secção 7.5.3.1) (Barron, 2009).



Fig. 6.33. Filarmónica de Berlim, Perspetiva (Eurnited Arts, 2020)

<sup>74</sup> Não há salas com campos perfeitamente difusos ou uniformes. No entanto, alguns engenheiros alemães dos anos 50 acreditavam que quanto mais próximo do ideal de uniformidade estivesse o campo sonoro, mais intensas seriam as sensações de envolvimento e reverberação. Estudos posteriores vieram contrariar essa ideia com a premissa de que quatro sentidos distribuídos são suficientes para que o espectador se sinta completamente envolvido por energia sonora, o que conduziu ao ideal da optimização geométrica das salas

A arquitetura desta sala promove uma boa sensação de intimidade na generalidade do espaço, embora não tenha sido ainda concebida sobre a base conceitual da importância das reflexões laterais, o que, aliado ao (pequeno ou grande) grau de inconsistência que o campo sonoro sempre apresenta numa sala<sup>75</sup>, faz com que alguns lugares sejam mais beneficiados do que outros. Mas ainda assim, as paredes próximas dos assentos constituem importantes superfícies refletoras, e o teto alto em forma de tenda, em conjunto com a difusão da sala, promove as sensações de reverberação e de envolvimento musical. No entanto, como não há bela sem senão, devido ao facto de o palco ser rodeado de lugares, o balanço orquestral sentido em certos pontos da plateia é desfavorecido, sendo que, na plateia de um lado do palco, os violinos evidenciam-se, e na plateia do lado oposto, os contrabaixos fazem-se notar. Para além disso, a diretividade dos instrumentos, que varia em cada caso, é sempre maior para a frente do que para trás, ou seja, quem está atrás da orquestra não recebe um som tão limpo e vivo, embora muitas pessoas não se incomodem com esses lugares, só por poderem ver as expressões do maestro (Beranek, 2004). Mais detalhe sobre a Filarmónica de Berlim poderá ser visto na secção 7.5.3.1.

Os desenhos de Cremer foram demonstrando sempre soluções geométricas arrojadas, mas pensadas de modo a providenciar um bom encaminhamento das primeiras reflexões. As soluções por si exploradas, como os terraços em trapézio, promovem as primeiras reflexões laterais (fig.6.34) cuja importância para um bom ambiente acústico havia entretanto sido despertada por Marshall, em 1968 (Beranek, 2004).

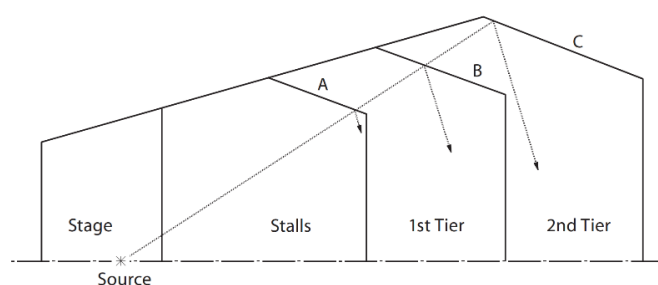


Fig. 6.34. Sala de terraços em trapézio em que, para otimizar as reflexões laterais, as superfícies A, B e C deveriam ser ligeiramente inclinadas para baixo. Esquema de Cremer (1986, de Barron, 2009)

As superfícies de limite dos terraços podiam ser inclinadas de modo a melhor encaminhar as reflexões para o terraço abaixo ou, se fosse o caso, para o piso principal. Muitas vezes planos

<sup>75</sup> A Inconsistência do campo sonoro significa que o campo não é perfeitamente uniforme em toda a sala. Há soluções arquitetónicas que conferem uma maior uniformidade do que outras, mas, em pequena ou larga escala, todos os campos apresentam alguma inconsistência

verticais de diversas alturas também eram inseridos na plateia, promovendo as reflexões. Isso pode ser visto na sala Musikcentrum Vredenburg, em Utreque, 1979, do arquiteto Hertzberger e consultores de Lange e Booy (fig. 6.35) (Barron, 2009).



Fig. 6.35- Musikcentrum Vredenburg, Utreque, perspectiva (Barron, 2009)

A forma de uma sala de concertos tem de ser adaptada à lotação, às demandas acústicas e às visuais. À medida que as dimensões aumentam, aumentam também os cuidados a ter com a satisfação dos vários parâmetros acústicos. A partir de 1990 as salas retangulares voltaram a ser moda entre as várias soluções construtivas e, para muitos, são consideradas as únicas soluções fiáveis. Mas há casos que comprovam que, por exemplo, muitas das formas em terraço, geralmente construídas para audiências maiores, se forem bem projetadas, podem oferecer qualidade acústica não inferior à das próprias salas retangulares de proporções clássicas, e apresentam até vantagens, pois oferecem a possibilidade de cada secção poder ser tratada individualmente, enquanto que em salas retangulares um tratamento numa superfície tem maior probabilidade de afetar o outro lado do recinto, e providenciam uma relação mais informal e visualmente mais íntima entre a orquestra e audiência. Para além disso, e como já foi referido, sem dúvida que essas soluções formais e geométricas se adequam melhor a uma maior afluência de público (considerando que a plateia se desenvolve em torno do palco, mais lugares podem haver a distâncias aceitáveis dos músicos) (Barron, 2009).

### 6.3.4. Tetos

A primeira consideração a ter sobre o teto é a distância ao chão, pois que a altura de uma sala é de elevada relevância para as condições acústicas, nomeadamente para a reverberação. Como já foi referido, os salões de baile e as primeiras grandes salas de concerto em si inspiradas eram providos de uma proporção tal que a altura corresponde à largura, sendo apenas metade do comprimento (1:1:2). Alturas demasiado elevadas podem prejudicar a sensação de intimidade, enquanto conduzem a uma exagerada reverberação. Por outro lado, alturas muito pequenas significam primeiras reflexões muito fortes em contraste com a cauda reverberante, o que se expressa em valores reduzidos de EDT<sup>76</sup> e numa boa clareza, uma vez que as reflexões do teto são logo absorvidas pela audiência. Quando os tetos são as principais superfícies refletoras, como acontece nas salas em leque de ângulo muito aberto, pode ocorrer uma certa coloração tonal.

#### 6.3.4.1. Tetos Planos

Os tetos das salas clássicas eram planos, apresentando por vezes característicos remates côncavos com as paredes, como o Atles Gewandhaus em Leipzig. As irregularidades, tanto por parte da estrutura (como vigas destacadas ou tetos cofrados), quanto por parte de ornamentações, ajudavam a dispersar o som por toda a sala<sup>77</sup> (Barron, 2009; Beranek, 2004). A figura 6.36 é uma perspetiva do Musikvereinsaal, na qual se pode ver a rica ornamentação do teto.



Fig. 6.36- Musikvereinsaal, Viena, perspetiva (Feixa, s.d.)

<sup>76</sup> Considerado por muitos autores como o principal parâmetro objetivo caracterizador da sensação do preenchimento sonoro, ou reverberação. Quando os valores de EDT são baixos, a sensação de reverberação pode ser compensada se o RT for mais elevado que as referências utilizadas como modelo

<sup>77</sup> Junto com o caráter ornamental das paredes, o teto esculpido contribui para uma rica difusão do som

Em Long (2006), recomenda-se uma altura mínima de 15 m para as típicas salas retangulares, sendo que as cofragens devem ter fissuras de cerca de 15 cm de profundidade (Long, 2006).

#### 6.3.4.2. Tetos curvos

##### a) Tetos côncavos

Tetos curvos aparecem comumente associados a formas de sala mais arrojadadas. No entanto, tal como nas paredes, a curvatura côncava nos tetos é um grande risco. Mais uma vez, o Royal Albert Hall materializa esse tipo de solução arriscada, a qual acabou por ser colmatada em 1970, com a suspensão de discos de fibra de vidro para atenuar os ecos (ver figuras na secção 7.4.3.1.) (Barron, 2009; Beranek, 2004).

Tetos côncavos foram uma solução adotada para direcionar o som para a plateia quando, na era moderna, as ornamentações ficaram “fora de moda”. Eram as chamadas salas direcionais, em que as superfícies nuas do teto constituíam segmentos côncavos que direcionavam as reflexões para todos os pontos da sala (fig. 6.36) (Barron, 2009).

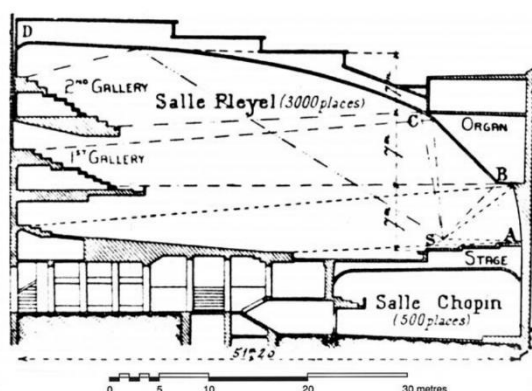


Fig. 6.37- Salle Playel, Paris, corte longitudinal. Cada segmento AB, BC e CD direcionam a energia sonora para diferentes seções da audiência (Barron, 2009)

Gustave Lion Rose, em conjunto com os arquitetos Auburtin, Granett e Mathon, concebeu a Salle Playel sobre esse conceito.

Com base em experiências acústicas sobre espelhos de água ao ar livre (Andrade, 1932, citado por Barron, 2009), Gustave concluiu que as reflexões eram fundamentais na transmissão sonora e até fez experimentos para determinar o seu atraso máximo aceitável, o que resultou em 67

ms. Na Salle Playel, a diagonal do palco é 23 m, o correspondente à distância que o som percorre em 67 ms, promovendo assim o conforto dos músicos, ou assim Gustave Rose pensava. De facto, a inteligibilidade era ótima, era possível ouvir uma leitura a 45 m de distância da fonte, pois a falta de ornamentação a par da diretividade reflexiva das paredes conduzia a fortes reflexões para todas as secções, numa sala da ordem dos 3000 lugares. Esta abordagem arquitetónico-acústica estava também no ideal de Le Corbusier para a Chamber of the League of Nations, em Geneva, 1927, de 2600 lugares. Contudo, apesar dos benefícios em relação à inteligibilidade, para manifestação musical esta abordagem construtiva não se adequa. O ambiente do espectador deve constituir um campo minimamente difuso, em que se verifique a existência de reflexões laterais, ao invés de um campo unidirecional com a energia das primeiras reflexões a níveis sonoros mais altos que o necessário<sup>78</sup>. Foi da intenção da entidade projetista que as paredes inclinadas para baixo conduzissem o som para a audiência, compensando assim o facto de o teto direcionar toda a energia para o fundo do recinto, mas isso não resolveu o dilema das fortes reflexões vindas de cima e de trás. Devido a estes problemas, a Salle Playel sofreu inúmeras alterações (Barron, 2009; Beranek, 2004).

Mais salas foram construídas sobre este conceito acústico- arquitetónico, que seria mais tarde chamado de “falácia do megafone” por Mc Kean (1996, citado por Barron, 2009). Sem surpresa, nenhuma delas se adequa a concertos, pois que, devido à unidirecionalidade do campo, e também devido aos baixos tempos de reverberação comuns nas salas com esta abordagem construtiva, não propiciam a tão consagrada sensação de envolvimento. Segundo Beranek (2004), a Salle Playel, mesmo depois das renovações, apresenta um tempo de reverberação de apenas 1,6 segundos (ocupada).

### ***b) Tetos convexos***

Por sua vez, superfícies convexas podem contribuir para um bom ambiente acústico, enquanto promovem a complexidade geométrica que tanto deleita a vista. Tetos convexas são frequentemente encontrados em salas em terraço, pois a disposição dos assentos, imitando as escarpadas vinhas dos vales, assim o exige<sup>79</sup>. A solução em tenda é muito flexível, ainda que por

---

<sup>78</sup> A sala conduzia a energia sonora para o fundo da sala, que depois a refletia, causando desagradáveis ecos.

<sup>79</sup> Um teto plano neste tipo de salas não acompanharia o desenvolvimento da plateia

vezes se manifeste a necessidade de suspender painéis refletores ou canópios abaixo do pico da “tenda”, uma vez que este se projeta algures entre o palco e lugares mais baixos<sup>80</sup> (fig.6.38).

A filarmónica de Berlim (fig.7.27) e a recente Filarmónica de Hamburgo (fig. 6.38) são exemplos de salas com este tipo de tetos.

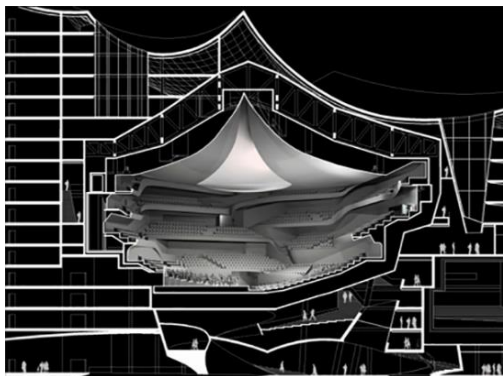


Fig. 6.38- Filarmónica de Hamburgo, Hamburgo, corte (wikiarquitectura, s.d.)

#### **6.3.4.3. Outras soluções geométricas**

Mas outras geometrias são também adotadas. Osaka Symphony Hall tem quatro superfícies convexas que desaguam num troço horizontal ao centro (fig.6.39). Em Tóquio, Takemitsu Memorial Hall em Tóquio Ópera City possui um teto piramidal sobre planta retangular (fig.6.40). O pico dista 28m do pavimento principal. A superfície da pirâmide é coberta por painéis QRD unidimensionais orientados na horizontal (ver ponto 6.5.2). Sem estes painéis difusores era provável que a plateia e o palco recebessem um forte eco. Beranek (2004) relata que a energia refletida pela parede traseira na direção das pessoas e do palco, em frequências superiores a 500 Hz, é reduzida em mais de 12 dB. Parte da energia sonora que os painéis do teto refletem em várias direções é encaminhada para as paredes laterais, o que intensifica as reflexões laterais. O desempenho da sala pôde ser estudado através de modelos digitais e analógicos. Em software CAD foi previsto o comportamento do campo sonoro conduzido por aquelas superfícies. Foi possível prever o atraso e a direção de chegada da energia sonora aos ouvidos. Depois, um modelo de madeira à escala 1:10 permitiu que a resposta da sala fosse simulada em modo real<sup>81</sup> e questões de ecos e de tempos de reverberação foram resolvidas (Barron, 2009; Beranek, 2004).

<sup>80</sup> O apoio das primeiras reflexões é muito importante para os músicos poderem tocar em conjunto, bem como para as sensações de intimidade e de aumento das dimensões da fonte sonora. Neste caso, visto o pico da teto em forma de tenda ser tão alto em relação a estas secções, esse apoio dá-se por meio de um canópio

<sup>81</sup> Em modo real, ou seja, em oposição ao modo virtual anteriormente referido



Fig. 6.39- Osaka Symphony Hall, perspectiva (Osaka Convention & Tourism Bureau, s.d.)

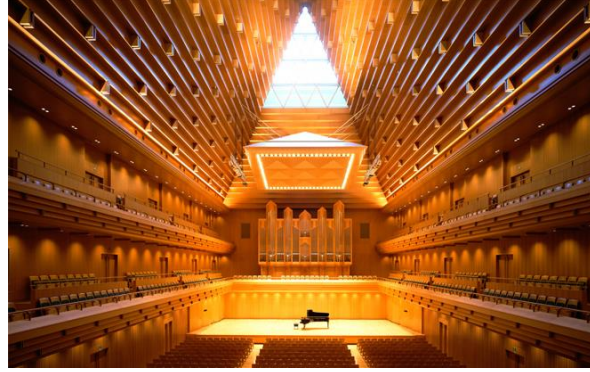


Fig. 6.40- Takemitsu Memorial Hall, perspectiva (Tokio Opera City Cultural Foundation, s.d.)

Como nas plantas, os tetos não tem uma solução geométrica que sirva de modelo para todos os casos. A integração de elementos como os difusores QRD e a relação com a planta são fatores a ter em conta e que se devem estudar em função dos parâmetros acústicos a satisfazer. Atualmente, software informático permite que mesmo as mais duvidosas soluções sejam testadas antes de construídas, embora muitas vezes a tecnologia seja falível. O apoio teórico em exemplos concretos de salas já construídas é da mais alta importância para se irem criando conexões, em termos cognitivos, entre os fatores acústico- musicais e aqueles arquitetónico-acústicos que promovem a experiência musical.

### 6.3.5. Pavimentos

#### 6.3.5.1. Piso inclinado

Para a disposição da plateia há duas considerações que devem ter-se em mente: a chegada do som direto e as linhas de visão. Por norma, quando estas últimas são favoráveis, também o som direto chegará sem dificuldade (Barron, 2009).

As linhas de visão são simples de desenhar. Em Barron (2009) é ilustrado o cálculo geométrico da inclinação ideal para boas linhas de visão (fig.6.41). No caso das varandas, 35 graus é a máxima inclinação que normalmente se adota. Para a determinação da inclinação do piso principal, toma-se a posição do ponto P de referência entre 0.6 e 0.9 m acima da frente do palco, enquanto que para a inclinação das varandas, considera-se a frente do palco como referência.

Já em relação ao som, deve ter-se em conta que a plateia absorve o som direto, logo, quanto mais inclinado for o pavimento, melhor este alcança os lugares traseiros. A absorção das frequências baixas do som direto é, na literatura, tratada separadamente da absorção das médias e altas frequências, pois que, para as frequências baixas, a absorção ocorre por “grazing incidence”, o que significa que os grandes comprimentos de onda são enfraquecidos por bloqueio sucessivo por parte de uma superfície (plateia) de impedância diferente daquela do ar. Quando não há superfícies refletoras próximas dos assentos, se estes estiverem num piso plano, visto que a atenuação das baixas frequências por “grazing incidence” é elevada, há um grande risco de a sala não responder aos baixos tocados pela orquestra. Isto aconteceu no New York Filarmonic Hall (agora Avery Fisher Hall), uma sala cuja falta de superfícies laterais próximas de grande parte da plateia foi compensada pela integração de painéis suspensos (fig.6.42). No entanto, os painéis não eram grandes o suficiente para refletir as frequências baixas<sup>82</sup>. Como resultado, grande parte das críticas à sala mencionavam a falta da sensação de calor no piso principal, o que é explicado pelo fenómeno de “grazing incidence” aliado à falta de reflexões nesta faixa frequencial<sup>83</sup>. Por sua vez, em relação à varanda mais alta da sala, as opiniões eram distintas, pois o pavimento era inclinado e, mesmo perante a falta de reflexões (das baixas frequências), a sensação de calor era sentida por parte do som direto. Bradley (1991, citado por Barron, 2009) aponta, como estratégia para atenuar os efeitos do fenómeno de atenuação por “grazing incidence”, para um ângulo do som direto em relação ao plano de assento maior que 15° (Barron, 2009; Beranek, 2004).

---

<sup>82</sup> Estas, ao invés de serem refletidas, tendiam a difratar

<sup>83</sup> Foi precisamente este acontecimento que, em 1962, levantou a questão da forte atenuação do som direto nas baixas frequências

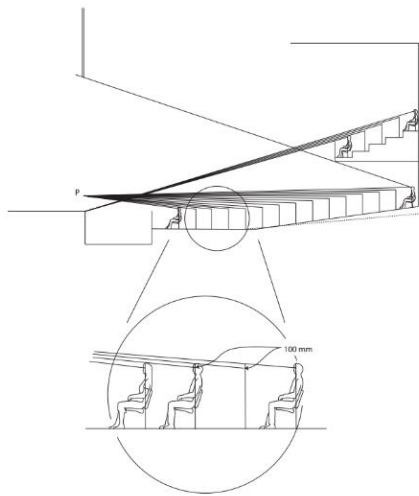


Fig. 6.41- Cálculo geométrico das linhas de visão (Barron, 2009)

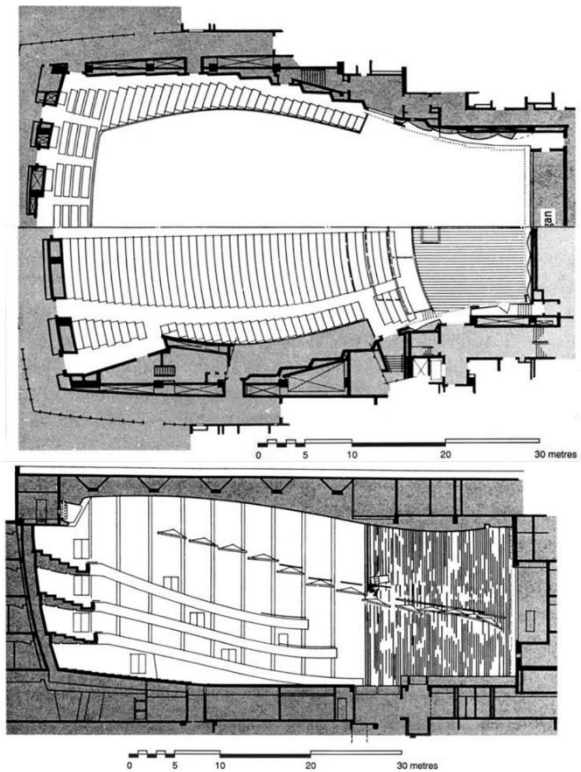


Fig. 6.42- New York Filarmonic Hall antes das renovações, planta e corte (Barron, 2009)

Face ao referido, o chão inclinado é uma mais valia, todavia, ocupa mais volume e área, o que pode ficar fora de limites orçamentais ou territoriais.

### 6.3.5.2. Piso não inclinado

No caso de o piso não ser inclinado, soluções como elevar-se o palco podem ser benéficas no sentido em que se aumenta o ângulo com que o som direto incide na plateia, reduzindo a atenuação das baixas frequências. Em Amsterdão e em Boston esta técnica foi utilizada (Long, 2006).

Outras soluções baseiam-se em compensar a carência de nível sonoro direto com fortes primeiras reflexões através das paredes laterais e do teto. Se o teto for a principal superfície refletora, e houver necessidade de pendurar painéis, estes devem ser largos para abranger as baixas frequências. No caso em que se opte por painéis suspensos, deve ter-se em conta que a sensação reverberante é prejudicada se a distância dos painéis ao pavimento for muito pequena, pois as primeiras reflexões tornam-se muito evidenciadas em relação à cauda

reverberante, e o som é mais rapidamente absorvido pela audiência, uma vez que não tem muito mais espaço para se propagar. Ainda, se a área aberta não for o suficiente, ou seja, se o grau de perfuração<sup>84</sup> demonstrar que a área dos painéis é semelhante à área da superfície do piso coberto pelo conjunto, vai ser originado um espaço autónomo acima dos painéis que, para além de não contrubuir para a reverberação abaixo sentida, funciona como uma caixa ressonante, comportando-se diferentemente conforme a frequência. Outro fator do insucesso do New York Filarmonic Hall (agora Avery Fisher Hall) foi precisamente uma extensa área coberta por painéis (fig.6.42), em que a área aberta era inferior a 50 %. Uma área aberta de pelo menos 70 % é recomendado por Cremer e Muller (1982, citado por Barron). Por outro lado, é importante que a mesma não seja exageradamente grande, para que a energia refletida seja adequada (Barron, 2009).

#### **6.4. Varandas e Camarotes**

As varandas e os camarotes constituem subformas da forma geral da sala. Os camarotes funcionam como espaços à parte (do piso principal, embora haja uma óbvia conexão entre ambos). As varandas, por sua vez, podem funcionar como espaços à parte, dividindo a sala verticalmente, ou podem ser a base da constituição da sala, como acontece nas salas em terraço (Long, 2006).

Em relação à disposição das varandas e camarotes na sala, considera-se que os melhores lugares são aqueles opostos ao palco ou nas imediações laterais dos mesmos, pois que ao pé do palco as linhas de visão não são tão boas (Barron, 2009; Beranek, 2004).

As lajes das varandas e camarotes, no caso de cobrirem filas de lugares em pavimentos inferiores, contituem pequenos tetos para os lugares abaixo, originando aí um ambiente acústico distinto do ambiente do resto da sala.

##### **6.4.1. Varandas**

As varandas têm como função aumentar a lotação sem que os lugares fiquem muito distantes do palco, bem como melhorar as linhas de som direto e de visão (Beranek, 2004; Long, 2006). Pode haver várias varandas e mais pequenas ou menos e mais longas. Algumas salas têm

---

<sup>84</sup> Comparação entre a área dos painéis e a área do pavimento por eles coberta

varandas que pouco ou nada se sobrepõem aos lugares de baixo, como a Osaka Symphony Hall no Japão (fig. 6.39), mas, talvez, na maior parte dos casos isso não aconteça, tornando-se importante ter algumas considerações.

Beranek (2004) recomenda que a varanda não cubra mais do que três filas de assentos. A figura 6.43 mostra alguns cortes de salas satisfatórias a esse respeito, embora nos dois últimos exemplos, a partir da terceira fila, já não se usufrua tanto do som reverberante. Por vezes, quando as aberturas são pequenas, até o som direto tem dificuldade em alcançar com força suficiente as filas mais traseiras. Por sua vez, a figura 6.44 demonstra desenhos de salas em que as varandas claramente prejudicam o ambiente acústico para os lugares abaixo.

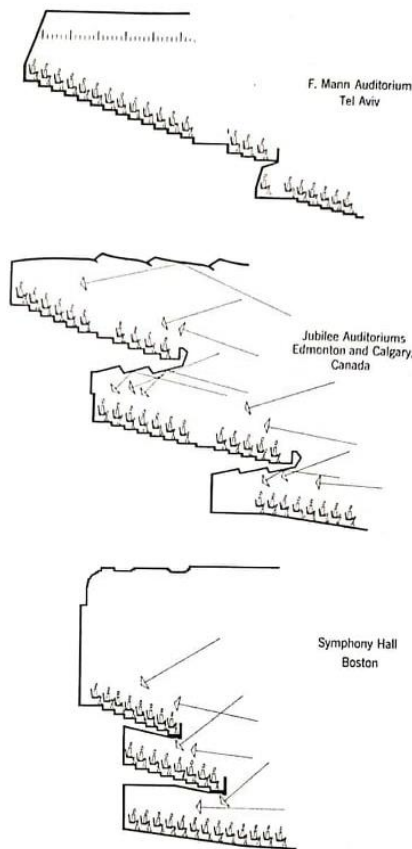


Fig. 6.43- Cortes destacando soluções adequadas da configuração das varandas (Beranek, 2004)

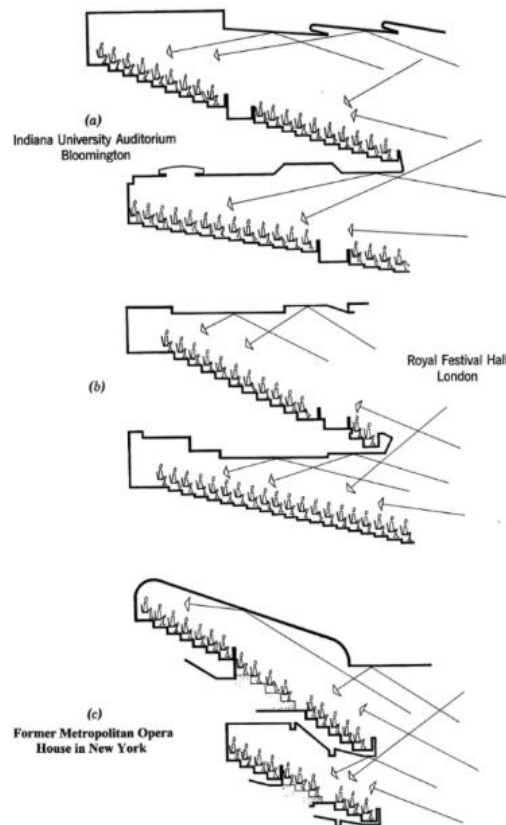


Fig. 6.44- Cortes destacando soluções desadequadas da configuração das varandas (Beranek, 2004)

Long (2006) recomenda que os pavimentos abaixo das varandas não sejam inclinados, para que as sensações de reverberação e de espacialidade não diminuam ainda mais.

Barron (1993, citado por Long, 2006) diz ainda que deve verificar-se a existência de uma linha de visão direta entre a última fila coberta e as superfícies refletoras do teto, não sendo o ângulo

entre estas (linha de visão e superfícies refletoras) inferior a  $45^\circ$ . Nas salas de ópera este valor pode reduzir até aos  $25^\circ$ <sup>85</sup> (Barron, 1993, citado por Long, 2006). Esta regra vai de encontro à premissa que Beranek (2004) apresenta sobre a razão entre D e H não ser superior a 1 para salas de concerto, nem superior a 2 para óperas (fig. 6.45).

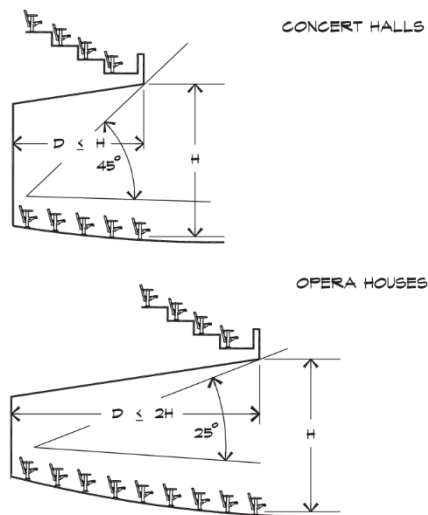


Fig. 6.45- Considerações dimensionais no desenho das varandas em salas de concerto (em cima), e em salas de ópera (em baixo) (Long, 2006)

Barron (1993, citado por Long, 2006) apresenta os valores de EDT obtidos em lugares debaixo de varandas (sem descrição) em função dos diferentes ângulos de visão permitidos pela abertura da boca das mesmas, em comparação com aqueles (valores de EDT) obtidos em lugares desobstruídos superiormente (fig.6.46) (Barron, 1993, citado por Long, 2006).

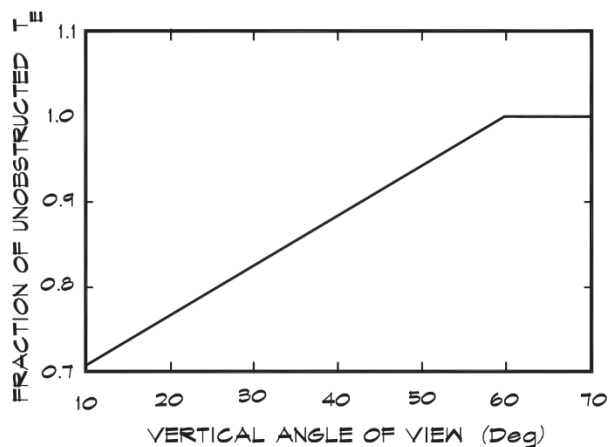


Fig. 6.46- Valores de EDT debaixo de varandas e, função dos ângulos de visão (Long, 2006)

Em relação à qualidade acústica na varanda em si, desde que não seja coberta por outra, as considerações a ter são a distância ao teto, se o chão é inclinado, se há superfícies laterais

<sup>85</sup> Nas óperas o atributo vivacidade não é tão preservado quanto nas salas de concerto, embora isso dependa da localização geográfica da ópera em relação ao idioma das obras

próximas que providenciem as primeiras reflexões, e todas as mesmas considerações a ter sobre o piso principal.

As soluções para que debaixo das varandas o ambiente acústico alcance um melhor desempenho podem ser ilustradas com exemplos de casos concretos, como em Grady Gammage Hall (fig.6.47), em Arizona. Nesta sala as varandas são semi- suspensas para que o som passe por detrás e chegue aos lugares de baixo. Knudsen (1965, citado por Long, 2006) apontou que os lugares de trás conseguiam usufruir de uma sensação de envolvimento semelhante àquela da zona do palco (Knudsen, 1965 citado por Long, 2006 p. 661).



Fig. 6.47- Grady Gammage Hall, Arizona, perspectiva com destaque para as varandas semi- suspensas de modo a não impedir a passagem do som reverberante para os lugares abaixo (Jen There Done That, 2015)

Também é possível inclinar verticalmente (para baixo) a superfície que limita a varanda para que alguma energia sonora aí incidente seja encaminhada para dentro. Quando não há lugares abaixo das varandas, essas superfícies limite são frequentemente inclinadas, mas desta vez, para encaminhar o som para outras secções da sala, como acontece, por exemplo, nas salas em terraço (Barron, 2009; Long, 2006).

#### **6.4.2. Camarotes**

É mais frequente encontrar- se camarotes nas salas de ópera do que nas de concerto. Eles permitem que uma sala de planta pequena (portanto com boas linhas de visão) acomode inúmeros lugares, mas dispostos na vertical. No entanto, quem não estiver ao pé da abertura dos camarotes não tem boa visão para o palco. Muitos camarotes laterais têm espelhos na parede oposta ao palco, para que as pessoas que se encontram no fundo vejam o espetáculo. (Beranek, 2004)

Pode dizer-se que o piso principal propicia um ambiente acústico mais vivo e agradável (Beranek, 2004).

Para melhorar as condições nos camarotes, em algumas salas foram removidos os separadores laterais, para que o som direto não fosse por eles obstruído. É o caso de Philadelphia Academy of Music (fig.6.48) (Beranek, 2004).



Fig. 6.48- Philadelphia Academy of Music (Amorosi, 2018)

## 6.5. Sistemas do revestimento

A interrelação entre a forma, materialidade e disposição define a acústica de uma sala de concertos.

O brilho, as sensações de calor e reverberação, a força sonora, são parâmetros diretamente ligados à materialidade.

À exceção do chão do palco, toda a envolvente da sala deve constituir materiais densos sobre a estrutura sólida para que a absorção seja mínima. Gesso pode ser aplicado sobre alvenaria, ou sobre ripas de madeira como acontecia nas estruturas antigas. Mas também pode ser aplicado sobre betão em três camadas com um total de cerca de 22 mm, ou até 52 mm (Beranek, 2004; Long, 2006).

Beranek (2004) e outros autores recomendam que revestimentos em madeira não tenham menos de 2,5 cm de espessura, para não absorver as frequências baixas e, à semelhança do gesso, podem ser aplicados sobre alvenaria, concreto ou ripas de madeira. No caso das ripas de

madeira, o sistema implica um espaço de ar entre a madeira do revestimento e a estrutura, o que absorve muito os baixos como a seguir se verá. No entanto, a absorção pode ser atenuada se o espaço for preenchido com placa de fibra de vidro prensada, ou outras, tornando o sistema mais denso (Long, 2006).

O chão pode ser constituído por madeira de, por exemplo, de 1,9cm de altura, sobre travessas de contraplacado da mesma espessura, sobre betão. Em alternativa, o revestimento pode ser material sintético sobre betão (Long, 2006). Nas salas mais modernas que adotam estas soluções, nota-se uma boa resposta aos baixos. Muitas vezes encontra-se nos corredores uma fina tapete (Beranek, 2004; Long, 2006).

### **6.5.1. Absorção**

É comum desejar-se que a sala seja construída em materiais rígidos sobre a estrutura, para que não se perca a sensação de calor, no entanto, num espaço acusticamente “escuro”<sup>28</sup>, é possível atenuar a excessiva reverberação nas frequências baixas. Revestimento em painéis de madeira ou outros sistemas podem contribuir para tal.

Os baixos são facilmente absorvidos quando há espaços de ar entre o revestimento e a estrutura, quer o revestimento seja poroso<sup>86</sup>, quer seja fibroso (sobretudo se for pouca espessura e denso), como painéis de madeira com menos de 2,5 cm. (Beranek, 2004; Long, 2006). Aliás, até certo valor, quanto maior for a distância entre esse tipo de revestimento e a estrutura, mais eficaz se torna o sistema absorvente à medida que as frequências diminuem, sendo que, segundo Carrión Isbert (1998), atinge desempenho máximo nas frequências cuja quarta parte do comprimento de onda se aproxima da dita distância (fig. 6.49). Quando o material é flexível e não poroso, o sistema é chamado ressoador de membrana (fig. 6.50) (Carrión Isbert, 1998).

---

<sup>86</sup> Se o revestimento for poroso, quanto mais espesso for o material, melhor absorve as frequências baixas, no entanto, para a poupança de recursos materiais, pode deixar-se um espaço de ar entre esse tipo de revestimento e a estrutura, o que permite reduzir a espessura do material, sem reduzir a eficácia de modo significativo

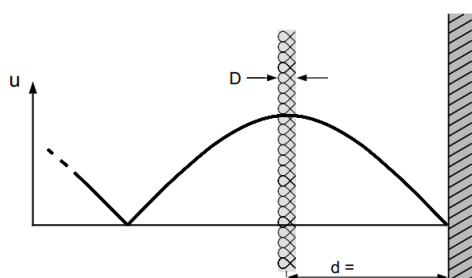


Fig. 6.49- Absorção máxima da frequência cuja quarta parte do comprimento de onda corresponde à distância entre o revestimento e a parede (Carrión Isbert, 1998)

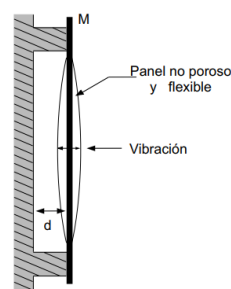


Fig. 6.50- Ressorador de membrana (Carrión Isbert, 1998)

Esta técnica (ressoador de membrana) foi usada no Atles Gewandhaus e no seu sucessor Newes Gewandhaus, mas não com a intenção de absorver. Ao invés, acreditava-se que tal sistema intensificaria o som, atuando como uma caixa de ressonância, sendo que, na realidade, atua como tal (caixa de ressonância), de outro modo não teria melhor desempenho em certas frequências (frequências de ressonância), mas, ao invés de amplificar o som, absorve<sup>87</sup> (Barron, 2009).

Também Vitruvius acreditava que tal sistema amplificava o som, mencionando no “*Tratado de Arquitetura*” (que os novos teatros romanos, uma vez construídos em madeira, auxiliavam a amplificação sonora da voz dos atores, embora não dispusessem de vasos ressonantes como aqueles integrados nos teatros gregos:

*Dirá, possivelmente, alguém que são levantados todos os anos em Roma muitos teatros onde não há qualquer aplicação destes princípios. Mas errará nisso, pois todos os teatros públicos de madeira têm vários entablamentos, que inevitavelmente ressoam. Isto mesmo é possível verificar pelos que cantam ao som da cítara, os quais, quando pretendem cantar num tom superior, se viram para as portas duplas da cena, recebendo do seu auxílio a ressonância da voz. (Vitruvius, 2015, p. 187).*

No entanto, na maioria dos casos, não é desejada a redução do nível sonoro nem do tempo de reverberação dos baixos, uma vez que os mesmos já sofrem atenuação à medida que as ondas incidem na plateia (“grazing incidence”, ver ponto 6.3.5.1). Deste modo, quanto mais espesso o revestimento (contanto que não seja poroso, pois que, se for poroso, quanto menos espesso,

<sup>87</sup> Nos palcos, ver-se-á adiante que uma solução comum é deixar uma caixa de ar de baixo do chão de madeira para aumentar o som dos baixos (e para arrumações). Neste caso, a amplificação sonora é possível, mas apenas porque o pavimento está em contacto direto com os contrabaixos e violoncelos

melhor), e quanto mais se aproximar da estrutura, menos absorção de baixos ocorre (Barron, 2009; Beranek, 2004; Carrión Isbert, 1998).

Posto isto, pode concluir-se que o espectro frequencial que caracteriza a resposta da sala ao impulso pode ser controlado através não só da geometria mas também dos sistemas aplicados como revestimento.

Ainda em contexto de absorção, há que referir-se a absorção das frequências altas que, quando em desequilíbrio em relação ao restante espectro, origina-se um ambiente acústico sem brilho, por vezes demasiado “escuro”. Deve começar por mencionar-se a questão da absorção pelo ar quando a humidade relativa é baixa (de 10 a 30 %), sendo que, este tipo de absorção apenas se evidencia acima dos 2kHz, sendo, na maioria dos casos, desprezável (Carrión Isbert, 1998). Para além do ar, os materiais como tapeçarias, ou materiais porosos (nestes termos a audiência funciona como um material poroso, devido à roupa), absorvem melhor as ondas de menor comprimento, o que explica o porquê de normalmente o RT das salas de concerto ser mais baixo nas altas frequências (Barron, 2009; Carrión Isbert, 1998).

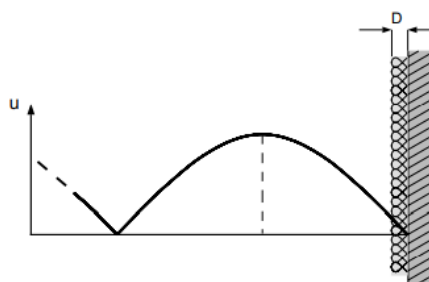


Fig. 6.51- Quando o revestimento poroso é fino, a absorção das baixas frequências é desprezável (Carrión Isbert, 1998)

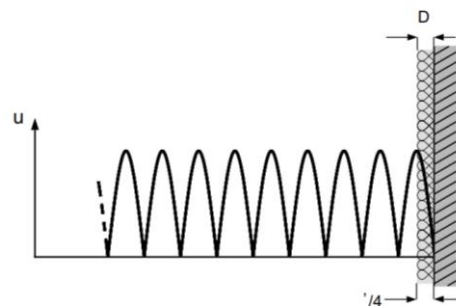


Fig. 6.52- Eficácia da absorção nas altas frequências, por parte de um revestimento poroso e fino (Carrión Isbert, 1998)

Neste tipo de materiais (porosos), quando o comprimento da onda (que cabe) dentro do material é pequeno em relação ao comprimento de onda total, a absorção é mais pequena, por isso quanto maior a espessura dos materiais, maior a faixa frequencial na qual a absorção é eficaz (figs. 6.51 e 6.52). A figura demonstra como o coeficiente de absorção de um material comercial à base de lã de vidro varia no espectro frequencial em função da espessura (Carrión Isbert, 1998).

O grau de porosidade também caracteriza a eficiência na absorção, sendo que, quanto mais poroso for, melhor desempenho terá (em todas as frequências). A figura 6.53 ilustra essa premissa, mostrando a evolução (ao longo do espectro) do coeficiente de absorção de três amostras do mesmo tipo de material absorvente mas com graus de porosidade diferentes. (Carrión Isbert, 1998).

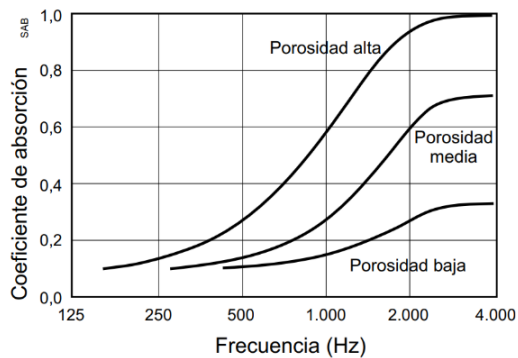


Fig. 6.53- Coeficiente de absorção em função da porosidade (Carrión Isbert, 1998)

A partir de um valor muito elevado de porosidade, as taxas de absorção diminuem, pois o material tende a comportar-se como sendo acusticamente transparente, como uma malha de padrão largo ou um velcro.

Cada um dos sistemas referidos é mais eficaz para uma determinada faixa de frequências, que, como foi conferido, varia em função da espessura, densidade, porosidade e distância à estrutura. No entanto, em casos em que se deseje a absorção discreta de frequência, como em situações em que se pretenda eliminar modos próprios de uma sala, o ressoador de Helmholtz tem vindo a mostrar-se eficaz, embora, à semelhança do ressoador de membrana, apenas seja útil na absorção de baixas frequências. Este sistema funciona como uma garrafa que emite uma nota musical quando alguém sopra no gargalo. Ao colocar-se um material absorvente acústico no interior, a energia sonora vai ser transformada em calor, ou seja, em vez de haver reprodução de som, há absorção. Um exemplo de ressoadores de Helmholtz integrados na arquitetura de salas de concerto pode ser encontrado na Filarmónica de Berlim. A materialidade e a geometria do sistema são os responsáveis pela frequência de ressonância. Neste caso os ressoadores são piramidais e, para além de funcionarem como sistema absorvente, atuam ainda como difusores, pois as superfícies externas são irregulares (figs. 6.54 e 6.55) (Carrión Isbert, 1998, p. 95).

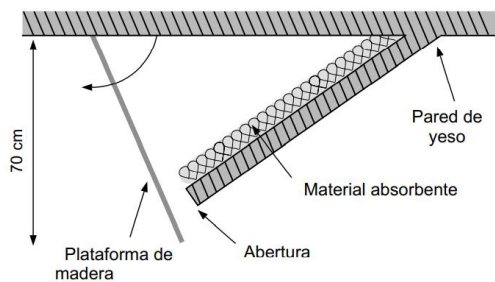


Fig. 6.54- Modelo dos ressoadores de Helmholtz da Filarmónica de Berlim (Carrión Isbert, 1998)



Fig. 6.55- Filarmónica de Berlim, perspectiva com destaque para os ressoadores de Helmholtz (Carrión Isbert, 1998)

Também há casos em que o sistema foi utilizado como amplificador sonoro. Vitruvius descrevia ressoadores de Helmholtz<sup>88</sup> nos antigos teatros gregos como sendo elementos de amplificação da voz dos atores: *“Quando, porém, os teatros são construídos com materiais maciços, como sejam os de concreto, pedra, mármore, que não podem ressoar, então são de aplicar estas soluções dos vasos de bronze”, “Deste modo, com esta disposição, a voz, lançada da cena como de um centro, espalhando-se e percutindo-se no contacto com as caixas de cada um dos vasos, será amplificada em nitidez e consonância harmónica consigo própria, numa conjugação de sons.”* (fig. 6.56) (Vitrúvio, 2015, p. 186 e 187). De facto, esses ressoadores em forma de vaso invertido e colocados em certas bancadas, sob os assentos, vibravam em frequências de 100 a 300 Hz, ajustando-se, portanto, a uma parte do alcance frequencial da voz humana. (Carrión Isbert, 1998; Serrano, 2018). No entanto, atualmente já não se emprega este tipo de função aos ressoadores de Helmholtz, até porque estudos mais recentes demonstraram que os ressoadores (sem absorvente sonoro), embora emitam, de facto, o som da frequência de ressonância, não o projetam para longe, sendo que só é percebido até cerca de 0.5 m a 1 m (Carrión Isbert, 1998). Ainda assim, Igor Sresnewsky, inspirado nos teatros gregos, projetou o auditório “Beethoven” (em Campinas no Brasil) com caixas ressonantes de várias frequências sob os assentos (fig.6.57) (Sresnewsky, s.d.).

<sup>88</sup> O ressoador de Helmholtz apenas foi assim batizado depois de, em 1860, Hermann von Helmholtz demonstrar as variedades tonais obtidas através de um recipiente ao qual chamou de ressonador; no entanto, já antes se verificava a utilização deste sistema



Fig. 6.56- Vasos ressoadores nos teatros gregos (Vitruvius, 2015)

Neste auditório, bem como no teatro grego, talvez o sistema resulte, como defendia Vitruvius, no reforço sonoro e promoção da inteligibilidade, ao ser colocado entre as bancadas<sup>89</sup>, mas, para efeitos de amplificação sonora em salas de concerto, este método, ainda que fosse muito bem estudado em termos da sua integração na arquitetura (por exemplo no que diz respeito à disposição e configuração, de modo a proporcionar uma filtragem equilibrada em cada lado da sala), sabe-se que, relativamente à sua integração na manifestação musical, não tem um desempenho previsível, uma vez que a orquestração não é constante, podendo causar distorções. Deste modo, normalmente em recintos para a música o reforço de notas musicais isoladas não é desejável, pois conduz a um ambiente desequilibrado, e então este sistema de Helmholtz é apenas adotado como absorvente (Carrión Isbert, 1998). Resta referir que, mesmo a aplicação do ressoador como absorvente pode criar desequilíbrios acústicos, se, por exemplo, houver uma exagerada absorção em certas frequências.



Fig. 6.57- Auditório Beethoven, Campinas (Simonetti, s.d.)

<sup>89</sup> Os teatros gregos eram providos de milhares de lugares, tornando-se este sistema útil nas fileiras mais afastadas

### 6.5.2. Difusão

Nas salas clássicas a rica ornamentação contribuía para a difusão do som, criando um sublime ambiente acústico, e conseqüentemente, promovendo uma excelente experiência musical. A sensação espacial de envolvimento é um marco destas salas. Uma técnica para a avaliação da difusão de salas foi desenvolvida por Haan e Frick (1993, citado por Beranek, 2004, p. 523). Esta técnica, “Sound Diffusivity Index” (SDI), baseia-se na inspeção do caráter ornamental das superfícies da sala em estudo, dividindo-o em três categorias, Alta difusão, Média e Baixa, conforme a adaptação das formas e dimensões das ornamentações ao local da sala em que se encontram (Beranek, 2004).

Segundo a descrição destes autores, caracterizam Alta Difusão superfícies baixas com irregularidades de cerca de 10 cm de profundidade<sup>90</sup>; superfícies superiores (na parte de cima) com elementos difusores de alguma profundidade dispostos aleatoriamente, ou nichos e colunas em repetição regular, e tetos cofrados ou com as vigas evidentes com alturas visíveis de mais de 10 cm, (mas sem ultrapassar os 25 cm, para que não bloqueie a continuidade das ondas). A Média difusão também é associada a superfícies com irregularidades, contanto que nas paredes elevadas as mesmas (irregularidades) não tenham mais do que 5 cm de profundidade. Também se inserem nesta categoria paredes e tetos quebrados e com profundidade variável, como as superfícies refletoras de Cristchurch Hall. A difusão baixa encontra-se nas salas com paredes muito lisas (por vezes côncavas) e com muitas superfícies com tratamento absorvente.

A avaliação baseava-se na atribuição de pontos às áreas conforme a categoria em que se inserem, sendo que às superfícies de alta difusão correspondia 1 ponto por metro quadrado, às de média 0,5, e às de baixa 0 pontos. Por exemplo, um teto com  $X \text{ m}^2$  de área, em que uma metade é lisa e a outra é cofrada (apresentado padrões de profundidades consideráveis), calcular-se-ia  $X/2 \times 0 + X/2 \times 1$ . De seguida, os valores resultantes da avaliação de cada superfície eram somados, conduzindo a um resultado que seria posteriormente dividido pela área superficial total. O resultado final haveria de corresponder um valor entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 1, mais alta é a difusão na sala. Haan e Frick não contavam as paredes traseiras (Beranek, 2004, p. 524).

À sala Musikvereinsaal, que dispõe de estátuas junto das superfícies mais baixas, e que tem paredes com janelas embutidas e ornamentações profundas em gesso, bem como teto cofrado,

---

<sup>90</sup>De modo a evitar encandeamento acústico por parte de primeiras reflexões especulares

etc, Haan e Frick atribuíram um SDI de 0.96, valor que se correlaciona com os pareceres subjetivos recolhidos da pesquisa de Beranek, nomeadamente em relação a atributos como o envolvimento e a reverberação. A par desta sala, outras providenciam um rico campo difuso, tais como Boston Symphony Hall, com ornamentações, estátuas e nichos nas paredes, e teto cofrado (ver secção 7.4.3.3.), Salzburg Festpielhaus (figs. 6.58 e 6.59), com estruturas difusoras de geometria especial dispostas nas paredes e teto, Beethovenhalle (fig. 6.32), e tantas outras (Beranek, 2004).



Fig. 6.58- Salzburg Festpielhaus, perspectiva (Kolarik,s.d)



Fig. 6.59- Salzburg Festpielhaus, perspectiva desde o palco (Caputo, s.d.)

Em contrapartida, em salas como Cristchurch Town Hall (fig. 6.26), London Royal Festival Hall (fig. 6.60), Liederhalle (fig. 6.61), e outras com muitas superfícies lisas, não são tão favorecidas as sensações de espacialidade e reverberação. Todavia, também não têm um campo difuso tão ausente como tinha, por exemplo, o New York Filarmonic Hall antes das renovações, sala na qual as paredes laterais lisas causavam mesmo encandeamento acústico (Beranek, 2004).



Fig. 6.60- Royal Festival Hall, Londres (Morris, 2020)



Fig. 6.61- Liederhalle Beethovensaal, Estugarga (Alemanha perspectiva (Trpceski,2019)

Em 1984, Manfred Schroeder desenvolveu, com base em sequências matemáticas, uma série de painéis difusores RPG (“Reflection Fase Grafting”), entre os quais os QRD (“Quadratic Residue Diffusers”), MLS (“Maximum- Length Sequences”) e PRD (“Primitive- Root Diffusor”). Estes

difusores consistem em superfícies ranhuradas e dimensionadas com base em cálculos matemáticos, e o que os difere entre si é o modelo matemático utilizado para a determinação da sequência e dimensão das ranhuras de cada um. São painéis que propiciam a difusão do campo sonoro, embora também absorvam energia, sendo, muitas vezes, utilizados com essa dupla função (Lagoa, 2016).

Painéis MLS foram aplicados em 1994 na Salle Playel, aquando da tentativa de dispersar melhor a energia das reflexões laterais<sup>91</sup>(fig.6.62) (Beranek, 2004; Lagoa, 2016).

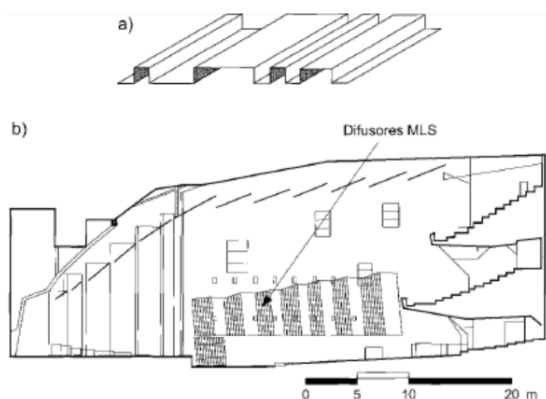


Fig. 6.62- Salle Playel, Paris, corte longitudinal com destaque para a integração de painéis MLS nas paredes laterais (Lagoa, 2016)

No entanto, esse tipo de painéis (MLS) não é muito eficaz em mais do que uma banda de oitava, o que limita a sua utilização para salas de concerto. Porém, deve ter-se em consideração que absorve menos as baixas frequências do que os outros dois tipos de difusores, constituindo assim uma possível solução para salas onde que haja encandeamamento acústico<sup>92</sup>, podendo ser aplicado numa área mais alargada sem que se corra o risco de o RT sofrer redução nas baixas frequências<sup>93</sup> (Lagoa, 2016).

Na figura 6.63 pode ver-se o desempenho de tal difusor.

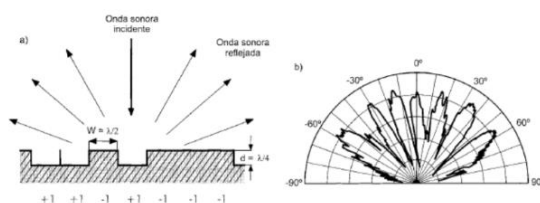


Fig. 6.63- Desempenho de um painel difusor MLS (Carrión Isbert, 1998)

<sup>91</sup> Devido ao facto de as paredes da sala serem inclinadas para baixo, as reflexões laterais eram desde logo absorvidas pela audiência, o que talvez explique o reduzido RT com a sala ocupada

<sup>92</sup> Causado por reflexões especulares, e mais evidenciado nos registos agudos dos instrumentos

<sup>93</sup> Facto que prejudicaria a sensação de calor

Na literatura sobre salas de concerto, os difusores QRD são muito referidos. Podem ser uni ou bidirecionais (figs. 6.64- 6.68).

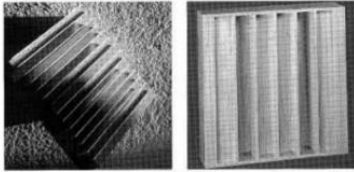


Fig. 6.64- Painéis difusores QRD unidimensionais (Carrión Isbert, 1998)

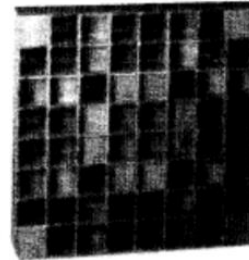


Fig. 6.67- Painel difusor QRD bidimensional (Carrión Isbert, 1998)

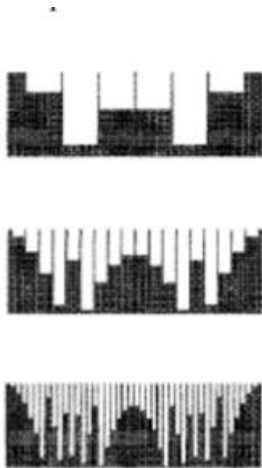


Fig. 6.65- Painéis difusor QRD unidimensionais, perfil (Carrión Isbert, 1998)

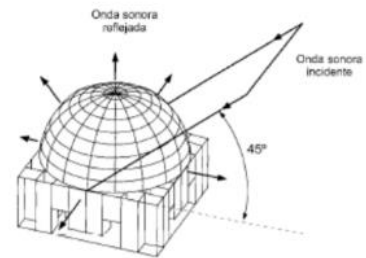


Fig. 6.68- Esquema 3D da difusão originada por um painel QRD bidimensional, por uma onda incidente a 45° (Carrión Isbert, 1998)

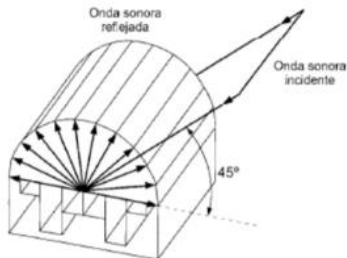


Fig. 6.66- Esquema 3D da difusão originada por um painel QRD unidimensional, por uma onda incidente a 45° (Carrión Isbert, 1998)

Estes abrangem uma maior faixa frequencial do que os MLS, faixa essa cujos limites máximo e mínimo são respetivamente determinados pela largura e profundidade dos poços, sendo que, segundo Beranek (2004), a profundidade praticamente não ultrapassa os 41 cm. Alguns modelos destes difusores (fig. 6.69) têm de ser aplicados em quantidades cautelosas devido à considerável taxa de absorção que têm associada (Beranek, 2004).

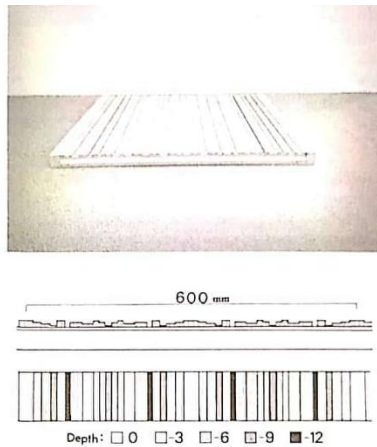


Fig. 6.69- Exemplo de painel QRD unidimensional e padrão das ranhuras (Beranek, 2004)



Fig. 6.70- Painel da parede traseira do Tokyo Opera City Concert Hall (CBSO Centre, 2013)

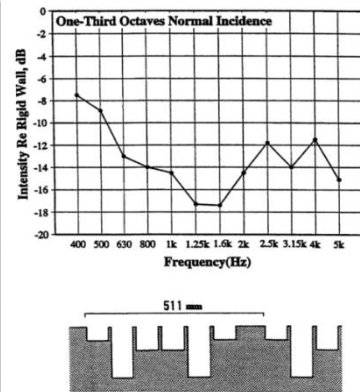


Fig. 6.71- Desempenho do Painel da parede traseira do Tokyo Opera City Concert Hall (Beranek, 2004)

No ponto 6.3.4.3. foi relatado como painéis deste tipo aplicados no teto do Tokyo Opera City Concert Hall reduziram em mais de 12 dB o nível sonoro em frequências acima dos 500 dB, mais especificamente dos 630 até aos 5000 Hz. A figura 6.71 ilustra o desempenho do painel horizontalmente instalado na parede traseira de frente para o palco (figs.6.70 e 6.71) (Beranek, 2004).

A variedade de seqüências e ordens de grandeza das irregularidades destes elementos pode ser escolhida conforme a localização no recinto. Beranek (2004) destaca que um som reverberante homogêneo está diretamente relacionado com as irregularidades das paredes altas e teto, enquanto que a difusão das primeiras reflexões, importante para que não haja encandeamento acústico, se relaciona com Irregularidades de cerca de 10 cm de profundidade, por exemplo, ou esculturas e estátuas à face das superfícies baixas.

A aplicação da materialidade numa sala está aliada aos outros aspetos arquitetónicos, nomeadamente a forma, pois que a integração de ambas afeta a resposta do recinto, tanto em termos do espectro frequencial, quanto no que diz respeito ao nível sonoro. A inserção de material difusor e absorvente, seja de caráter ornamental ou puramente funcional (como os

RPG, embora também acabem por integrar a decoração) é desejável e importante, pois embora haja evidências de que não é necessário que todas as superfícies tenham características difusoras para que o ambiente acústico seja bom (Barron, 2009), é sabido que este com certeza não o é se a sala não tiver características difusoras de todo. Nessas situações, efeitos indesejáveis podem ocorrer, como encandeamento acústico, que se torna evidente por via de um desequilíbrio espectral que acontece por ênfase de certas frequências em relação a outras, em que normalmente as mais altas “encandeam” (Beranek, 2004).

## 6.6. Assentos

Os assentos são uma dimensão muito importante das salas de concerto, pois a audiência absorve grande parte da energia emitida pela orquestra, e a sua disposição, bem como a materialidade das cadeiras, tem um grande impacto nas sensações da experiência musical.

O enchimento dos assentos deve ser tal que a capacidade de absorção da cadeira desocupada não difira muito da taxa verificada quando ocupada. Não devem ser aplicados sprays de proteção na capa do estofado<sup>94</sup>. Literatura recomenda que os assentos sejam submetidos a testes em câmaras reverberantes antes de serem instalados na sala; no entanto, como apenas uma amostra de assentos pode ser testada, a relação entre a área perimetral (pois as bordas laterais dos blocos de assentos também absorvem energia) e a área acústica obtida nos resultados do teste é diferente da relação real na sala, em que a disposição dos lugares é outra (Barron, 2009).

Beranek (2004) recomenda que a parte superior do estofado do encosto não ultrapasse os 2,5 cm de espessura, e, no assento, os 5 cm. Ele menciona também a importância de a estrutura da cadeira ser constituída por materiais moldados, como madeira compensada, bem como de não ser completamente envolvida por estofado, sendo que os braços e as partes de baixo e de trás devem ficar livres. A área total da audiência depende do número de lugares, mas sabe-se que nos dias de hoje mais espaço é requisitado por pessoa em comparação com o que antigamente acontecia, o que significa que, numa sala construída com base nas antigas, tanto a nível dimensional e quanto a nível formal, não pode haver tantos lugares quanto noutros tempos haveria. Isto claro, se essa sala tiver no motivo construtivo as mesmas intenções musicais e consequentemente acústicas das outras nas quais se inspirou. Long (2006) ilustra em tabelas as taxas de absorção em várias bandas de frequência em função do enchimento das cadeiras

---

<sup>94</sup> Para que assim os assentos desocupados não reflitam muito mais som do que quando estão ocupados

(situação ocupada em comparação com a situação desocupada) (tabs. 6.1 e 6.2. A tabela 6.2 contextualiza a anterior, demonstrando os valores a partir dos quais os enchimentos são considerados muito ou pouco “pesados”).

Tab. 6.1- Absorção das cadeiras em função da espessura do estofo (Long, 2006, de Beranek & Hidaka, 1998)

Type of Seat	Octave Band Center Frequency (Hz)					
	125	250	500	1k	2k	4k
Unoccupied with the weight of upholstery noted						
Heavy	0.70	0.76	0.81	0.84	0.84	0.81
Medium	0.54	0.62	0.68	0.70	0.68	0.66
Light	0.36	0.47	0.57	0.62	0.62	0.60
Occupied						
Heavy	0.72	0.80	0.86	0.89	0.90	0.90
Medium	0.62	0.72	0.80	0.83	0.84	0.85
Light	0.51	0.64	0.75	0.80	0.82	0.83

Tab. 6.2- Espessuras de estofo de referência (Long, 2006, de Beranek & Hidaka, 1998)

Type of Seat	Front Side of Seat Back	Rear Side of Seat Back	Top of Seat Bottom	Arm Rest
Heavy	7.5 cm	Sometimes	10 cm	2 cm
Medium	2.5 cm	0	5 cm	Solid
Light	1.5 cm	0	2.5 cm	Solid

Antes da instalação, dever-se-ia ainda assegurar de que não há distorção sonora por parte de ressonâncias na estrutura, o que pode acontecer para frequências inferiores a 300 Hz (Beranek, 2004).

## 6.7. Palcos

O espaço do palco merece particular atenção, tanto a nível formal quanto material, pois que é o foco das atenções do resto da sala, ao que tem de responder aos requisitos dos músicos, enquanto promove entre estes e a plateia uma comunicação visual e sonora. Apenas a partir de 1975 é que se começaram a investigar os requisitos particulares do palco. Desses estudos, os quais envolvem uma sobreposição de explicações físicas com os testemunhos que as salas foram deixando ao longo da história, foi possível obter-se (embora com maior dificuldade em comparação com o adquirido para o resto da sala) algumas linhas guia. De facto, se a complexidade do campo sonoro no corpo principal extravasa qualquer modelo descritivo, no palco, a situação ainda se torna mais complexa. Desde a posição dos músicos, passando pela diretividade dos instrumentos, até à própria orquestração (que varia constantemente), o campo sonoro torna-se difícil de explicar. Não obstante, a análise e os modelos que simplificam esse complexo aparato concentram-se sobretudo na satisfação de dois parâmetros especiais: a capacidade dos músicos ouvirem os seus instrumentos, e a capacidade de ouvirem os instrumentos dos outros (Barron, 2009).

### 6.7.1. Disposição da orquestra

A disposição dos instrumentos numa orquestra variam, mas em geral a sua organização assenta nos princípios acústico- musicais base como a potência dos instrumentos e a mistura de timbres de cada composição. Assim, geralmente as orquestras apresentam a disposição tal como ilustra a figura 6.72 (Adami, 2012).

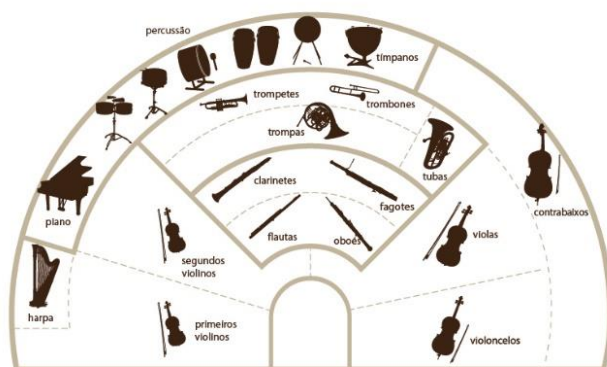


Fig. 6.72- Layout de uma orquestra (Adami, 2012)

### 6.7.2. Dimensões e disposição

Tal como aconteceu com a área necessária por pessoa na plateia, a área requisitada por músico aumentou. No entanto, em palcos muito grandes os músicos tendem a espalhar-se, de modo a preencher todo o espaço, enquanto se aproximam da audiência, perdendo assim o apoio acústico das paredes do palco (Barron, 2009; Long, 2006). Em Gade (1989, citado por Barron, 2009) é descrito que quando os músicos distam mais de 8 m entre si, o atraso do som direto não facilita a execução do conjunto orquestral, sendo que, pelo contrário, torna-se mais complicado para os músicos comunicarem uns com os outros. Beranek (2004) alerta para a necessidade de integrar elementos como conchas acústicas, painéis suspensos, irregularidades, ou outros que promovam as primeiras reflexões para a orquestra, em casos em que o palco disponha de uma área superior a 186 m<sup>2</sup> e uma altura superior a 18,3 m. O mesmo autor (1962, p. 498, citado por Barron, 2009) atribui 1,9 m<sup>2</sup> por músico como o rácio ideal, o que conduz a uma área de quase 200 m<sup>2</sup> para uma orquestra de 100 músicos. Por sua vez, Barron (1993, citado por Barron, 2009) faz uma distribuição diferente. O autor sugere que os naipes dos violinos, violas e instrumentos de sopro (de registos agudos, pois são os mais pequenos) disponham de 1,25 m<sup>2</sup> por músico, os naipes dos violoncelos e dos aerofones maiores usem de 1,5 m<sup>2</sup> por pessoa, os contrabaixos, 1,8 m<sup>2</sup>, os tímpanos, 10 m<sup>2</sup>, e a restante percussão, 20 m<sup>2</sup>. Feitas assim as contas, o resultado seria uma área ocupada de 150 m<sup>2</sup> para uma orquestra sinfónica (100 pessoas), sendo que a tal valor

dever-se-ia acrescentar a área de circulação (que aumenta em caso de haver patamares para os músicos), a área do piano e extra percussão (se for o caso), uma faixa de 1m na frente do palco, e, para um maior conforto, pequenas faixas ao longo das paredes laterais e traseira. Nestas condições, os 200 m<sup>2</sup> de área de Beranek seriam uma medida mais justa. Também a área do coro, que se deve distribuir na razão de cerca de 0.5 m<sup>2</sup> por pessoa (o que implica 50 m<sup>2</sup> de área no caso de haver 100 vocalistas), deve ser contabilizada e possível de acrescentar através de um sistema que permita estender o palco na direção da audiência quando for necessário, deixando espaço atrás para o coro. Para tal, sistemas hidráulicos são uma opção, mas para serem eficientes ficam muito caros, ao que uma outra alternativa que consista na adoção de soluções baseadas na montagem de elementos soltos, como se pode numa das possíveis configurações da sala Derngate Center<sup>95</sup>, em Northampton, se torna plausível, ainda que também esta (opção) possa ficar cara e levar um considerável tempo no manuseio. Outra possibilidade é o coro ficar num espaço à parte para si propositado, como uma varanda elevada, como no Royal Festival Hall em Londres (fig. 6.60), o que é uma opção favorável em termos da facilidade da sala em acolher coro, pois que, mesmo na ausência deste, os lugares podem ser ocupados por espectadores (Barron, 2009).

Qualquer das opções deve ser, na sua integração no todo da sala, formalmente e materialmente otimizada, de modo que todos os naipes recebam suporte adequado da envolvente do palco. Patamares semicirculares favorecem os caminhos do som direto para a plateia e entre os músicos, bem como propiciam um bom contacto visual entre o condutor e a orquestra. Os patamares devem ser espaçosos o suficiente para acolher os músicos e as estantes de cada fila (Long, 2006).

Em Barron (2009) e Long (2006) são recomendadas as profundidades dos patamares em função dos naipes, sendo 1,25 m para os violinos e sopros, 1,4m para violoncelos e um pouco mais para os metais e os contrabaixos, cerca de 2,8 m para a percussão, e, se coro houver na continuidade da orquestra em palco, 0,7 m para coro de pé ou 0,8 sentado. A altura dos patamares deve poder ser ajustável, mas como referência, 10 cm é uma medida aceitável para a primeira fila, devendo ir aumentando nos escalões de trás.

---

<sup>95</sup> Esta é uma sala multifunções, acolhendo atividades desde concertos a feiras. Usa de sistemas que funcionam sobre o princípio do hovercraft, o qual permite que elementos pesados, como vagões de assentos, sejam facilmente movidos, permitindo alterar a configuração da sala. No entanto, estes sistemas mais complexos são complementados com sistemas mais simples, como a montagem de elementos "soltos" para alguns blocos de assentos (Barron, 2009)

A dimensão do palco não deve ser grande a pontos de dificultar a comunicação entre os músicos (não deve haver atrasos grandes na chegada do som direto nem das reflexões), mas também não pode ser pequena a pontos de lhes gerar desconforto físico e acústico, ou ainda de originar desequilíbrio sonoro na audiência, no sentido em que os instrumentos que geram um maior nível sonoro, como a percussão, mascaram os outros. Em Barron (2009) recomenda-se, para uma orquestra sinfónica de cem elementos e sem coro (200m<sup>2</sup>), um tamanho tal que a largura não ultrapasse os 18 metros, e a profundidade, os 12 m. Long (2006) apresenta dimensões convergentes com estas para a mesma área de 200 m<sup>2</sup>, recomendando 17 m de largura e uma profundidade de 11 a 12 m. Um palco muito largo, para além de comprometer a comunicação entre os músicos, causa um ambiente desequilibrado nos extremos opostos das primeiras filas, em que uns ouvem primeiro os instrumentos do seu lado e só depois os outros. Por sua vez, com um palco muito profundo, em qualquer parte da sala se nota a diferença entre a chegada do som direto dos instrumentos mais próximos da plateia e a chegada do som direto dos instrumentos mais afastados (Beranek, 2004). Também é desejável a integração de sistemas que permitam reduzir o tamanho do palco para, por exemplo, concertos de música de câmara, ao que a estratégia em paredes movidas por elevadores da grande sala da Gulbenkian é um bom exemplo (Barron, 2009).

Barron (2009) menciona que a altura do pavimento do palco não deve ser menor que 0.5 m, para que possa haver um bom desempenho na projeção do solista sobre o corpo principal da sala. Long (2006) indica que em teatros a altura dos palcos é logo abaixo do nível de visão na primeira fila, mas, uma vez que em salas de concerto as linhas de visão não são tão valorizadas quanto nas outras, alturas mais altas podem ser vantajosas no sentido em que aumentam o ângulo de incidência do som na plateia, reduzindo a absorção das baixas frequências por “grazing incidence”. Em Boston Symphony Hall, o palco está a 1,40 m do pavimento.

### **6.7.3. A envolvente**

Em função da localização e tipo de palco, podem-se distinguir quatro *designs*, como ilustrados na figura 6.73.

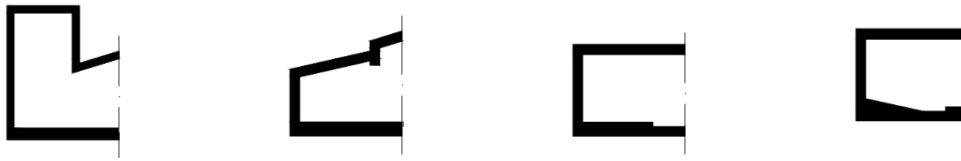


Fig. 6.73- Tipos de desenho de palco comuns (figura elaborada pelo autor)

### 6.7.3.1. Palcos com Torre (flytower)

Em salas com vários propósitos é comum o palco ter uma estrutura separada do corpo principal da sala, dispondo de um ambiente que não é totalmente acessível, nem visual nem acusticamente, pela plateia (stagehouse). Estes palcos são constituídos por uma torre que possibilita a alternância de cenários para ópera, teatro ou ballet. Para concertos, são normalmente instaladas conchas acústicas desmontáveis e painéis refletores suspensos ou canópios. No Texas, o palco de Bass Performance Hall é um bom exemplo. Aqui, um “concert hall shaper” permite, quando desejado, aumentar o volume do palco sem que a energia sonora fique sujeita à absorção dos cenários elevados. Um conjunto de painéis torna o ambiente mais próprio para concertos (figs 6.74 e 6.75) (Beranek, 2004), para os quais este sistema de painéis ou canópios é inestimável, uma vez que não é desejável que a orquestra toque num espaço com uma acústica totalmente diferente daquela do resto da sala, pois que, tendo em conta que os músicos tocam em função do que ouvem, a falta de noção sobre a acústica do corpo principal, no qual se situa a audiência, poderia conduzir a um desentendimento entre os requisitos do público e a interpretação da orquestra.

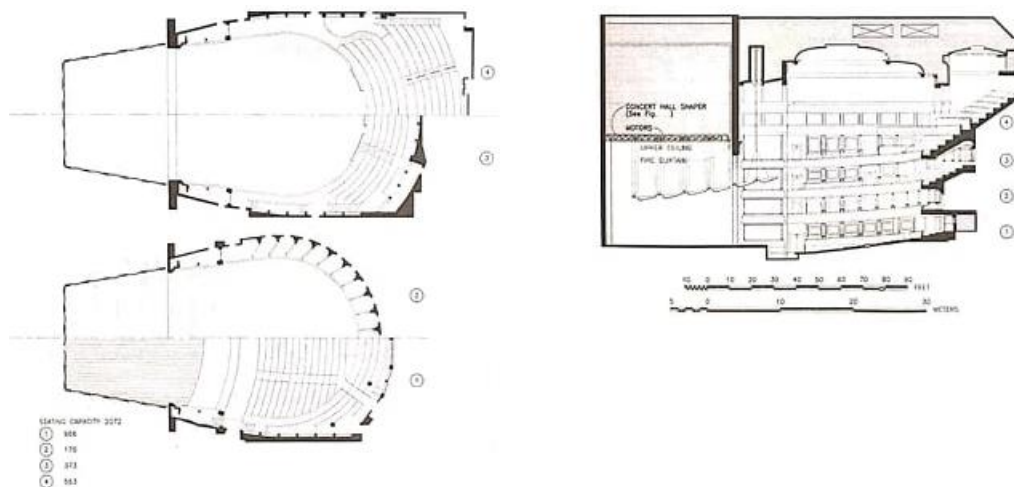


Fig. 6.74- Bass Performance Hall, Texas. Plantas e Corte (Beranek, 2004)

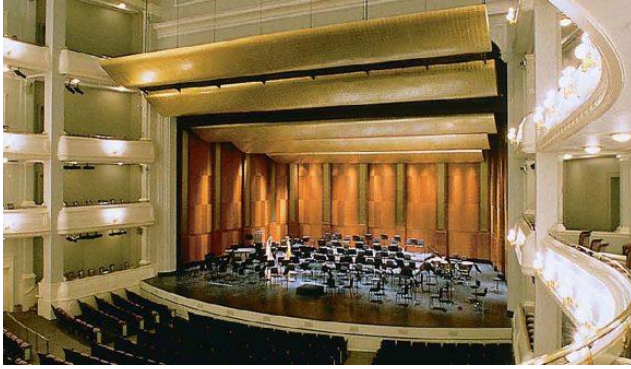


Fig. 6.75- Bass Performance Hall, perspectiva (FDA, s.d.)

### **6.7.3.2. Palcos com envolvente própria**

Há palcos que, à semelhança dos anteriores, têm um corpo próprio, ou seja, dispõem de uma envolvente que não a do corpo principal (embora ambas se integrem), mas a sua configuração é exclusivamente adaptada ao uso orquestral, pois não dispõem de torre. No entanto, se as suas dimensões forem demasiado grandes<sup>96</sup>, o atraso (acima do ideal) das primeiras reflexões de apoio à orquestra vai ter de ser, tal como no caso anterior, ajustado com elementos como conchas acústicas, painéis suspensos, canópios, etc...

Boston Symphony Hall inovou o desenho das salas de concerto clássicas através da atribuição de um corpo separado ao palco (nas antigas salas clássicas como Musikvereinsaal, Concertgebouw e Gewandhaus, o palco pertence ao corpo principal). Como tal, as filas de trás encontram-se mais distantes do mesmo, o que, segundo Sabine (1922, citado por Barron, 2009), é compensado pelo maior apoio pelas paredes da sua envolvente (do palco) que estão mais próximas, permitindo um melhor desempenho orquestral, o qual é notável na plateia. Ademais, a envolvente é desenhada como uma concha acústica que, para além de apoiar os músicos, auxilia na projeção do som para o resto da sala (Barron, 2009). Para além das superfícies que envolvem o palco, também o proscénio deve ter uma configuração tal que assista os músicos, ao mesmo tempo que projeta o som para fora.

### **6.7.3.3. Palcos no corpo principal**

Nas salas em que o palco se encontra no corpo principal é esperado que os músicos tenham uma maior noção do ambiente acústico do espectador, pois o apoio para a orquestra vem da continuidade das superfícies que apoiam o resto da sala (Beranek, 2004). Na sala Vienna

---

<sup>96</sup> Beranek (2004) recomenda como valores que não devem ser ultrapassados os 186m<sup>2</sup> e os 18,3m de largura

Musikvereinsaal, por exemplo, a orquestra é apoiada pelas superfícies da varanda que a rodeia. Em algumas destas salas também pode ser necessária a integração de elementos de suporte extra, como conchas acústicas, painéis suspensos, etc....

#### **6.7.3.4. Palcos no centro**

O palco no centro da sala é, de entre todos, aquele que logo à partida requisita meios extra de apoio aos músicos, pois o melhor que a configuração da sala só por si pode dar, esgota-se na inclinação das superfícies limite das varandas, e no teto. Não havendo paredes nas imediações, nem sendo propícia a instalação de conchas acústicas (uma vez que há plateia em todo o redor do palco), as soluções prendem-se em painéis suspensos<sup>97</sup> (de preferência convexos) ou canópios.

Barron (2009) recomenda que os painéis não ultrapassem as distâncias ao chão em mais de 8 a 10 m, para que não se tornem demasiado próximos da orquestra nem da audiência, e tampouco, demasiado afastados. É possível optar por um único painel largo, mas, segundo pesquisas indicam, é preferível, até para reduzir os riscos de coloração, optar por vários painéis pequenos ao que, com cerca de 1,5 m<sup>2</sup> cada, e deixando 50 % de área aberta, já há reflexão de frequências baixas (Rindel, 1991, citado por Barron, 2009, p. 60).

O uso de canópios pode ser vantajoso no sentido em que integra logo os sistemas de iluminação e permite um maior ajuste em altura. Russell Johnson, que outrora havia trabalhado com Beranek, Newman e Bolt nas soluções à base de painéis em diversas salas multiuso, funda a sua própria empresa, cuja filosofia construtiva muda completamente para o uso de canópios (Barron, 2009).

Em todos os casos, a integração de elementos extra de apoio depende do grau de suporte que a envolvente original fornece aos músicos, o qual varia em função da forma, materialidade e dimensões da mesma. As implicações destes fatores no campo sonoro em palco são análogas

---

<sup>97</sup> A título de curiosidade, Beranek era um grande adepto do uso de painéis, o que era notável nas suas consultorias. Nos anos 50, ele, Newman e Bolt foram convocados como consultores acústicos do New York Filarmonic Concert Hall que estava a cargo do arquiteto Max Abramovitz. Beranek, através de uma intensiva pesquisa (em 54 salas de concerto e óperas) sobre as características que tornam um recinto para música acusticamente excelente (pesquisa essa da qual o livro *Music, Acoustics and Architecture* haveria de ser publicado no ano da abertura do Filarmonic hall, em 1962), atribuiu como mais relevante para o sucesso acústico a promoção da sensação de intimidade, que logo relacionou com o atraso da primeira reflexão em relação ao som direto (ITDG), o qual não deveria exceder 20 ms. Não tendo ainda presente a ideia de que as reflexões deveriam ser laterais (o que só foi proposto por Marshall em 1968), e sendo a sala grande e larga em relação aos valores standard das salas clássicas de excelente acústica, Beranek julgou conveniente compensar a larga dimensão da sala, a qual iria originar reflexões laterais fracas, com a integração de painéis suspensos sobre o palco e grande parte da plateia. Assim foi feito, sendo que os painéis abrangiam mais do que 50% da área que cobriam, (ou seja, segundo Cremer e Muller (1982, pag. 112, citado por Barron, 2009), que sugeriam uma área aberta de pelo menos 70%, eram muito próximos uns dos outros), criando um espaço acima à parte do resto da sala, que não aumenta o RT, pois não há uma comunicação entre os espaços que o promova, e que se comportava diferentemente conforme a frequência. Para além disso, eram elementos pequenos, o que significa que não refletiam as baixas frequências que, sofrendo já muita atenuação ao incidir na plateia, eram pouco sentidas no primeiro nível da sala, o qual quase não tinha inclinação, deixando a sensação de calor aquém do que é desejado

ao que acontece na plateia, logo, os requisitos formais apresentam similaridades, com algumas variações. As paredes do palco devem ter algum (pouco) grau de abertura para que o som seja encaminhado para fora, e devem ser um pouco inclinadas para baixo, para otimizar as reflexões para a orquestra. Ademais, a disposição de elementos absorventes deve obedecer ao layout orquestral.

#### **6.7.4. Materialidade**

Segundo Beranek (2004) e outros autores, os painéis de madeira usados como acabamento não devem ter menos de 2.5 cm de espessura, para não absorver os sons graves, embora se encontre muitas vezes madeira de 1,9 cm de espessura nos tetos e paredes da envolvente do palco.

O chão do palco merece uma consideração especial. É a única superfície da sala construída em madeira sobre caixa de ar. Este tipo de sistema absorve o som que lhe é transmitido pelo ar, contudo, quando os instrumentos estão diretamente em contacto com a superfície, funciona como uma caixa de ressonância de um instrumento musical (entende-se, neste contexto, que a caixa de ressonância aumenta o som por aumentar a área vibrante, não por o som produzido corresponder às frequências de ressonância da caixa, o que também pode acontecer, embora não seja provável que aconteça em toda a gama de frequências que o instrumento produz (Beranek, 2004). Para além disso, a vibração do piso favorece o contacto entre os músicos. Deve ter-se o cuidado de a madeira não ter demasiada espessura, para que possa vibrar, sendo que, no entanto, também não deve ser muito fina, para não absorver demasiada energia sonora que lhe chega via aérea. Em Barron (2009) é recomendado um dimensionamento mínimo que compreenda pavimento de 2,5 cm de espessura sobre travessas dispostas com intervalos de 60 cm (Barron, 2009).

Por vezes torna-se ainda necessário integrar pequenas quantidades de elementos absorventes junto dos instrumentos mais potentes, tais como certos metais e percussão. As áreas absorventes deveriam demonstrar flexibilidade em alternar entre difusão e absorção para que outras disposições orquestrais possam haver. Junto dos instrumentos que emitem um maior nível sonoro não devem ser suspensos refletores, pois prejudicaria a definição ou clareza, tanto entre os músicos, quanto na audiência, uma vez que esses instrumentos mascarariam os demais. Para além disso, o palco também deveria dispor de algumas características difusoras para que não haja focalizações, por exemplo, em Avery Fisher Hall, grandes elementos difusores arredondados apoiam os músicos (fig. 6.76).



Fig. 6.76- Avery Fisher Hall (Avery Fisher Hall, s.d)



## 7. CONTEXTO HISTÓRICO- MUSICAL DO DESENVOLVIMENTO DAS SALAS DE CONCERTO

*A Música gera algo que tem a ver com a nossa natureza profunda, a nossa consciência; com uma abertura, uma abertura que nos liga a um universo, que nos liga a uma Verdade que nos liga a algo que tem a ver com aquilo que é bom*

Maria Joao Pires

As salas de concerto e óperas têm sido ao longo de séculos obras de grande valor arquitetónico pelo papel fundamental que desempenham sobre a sociedade. O valor arquitetónico de qualquer obra, devido ao carácter impositivo e habitacional da arquitetura, prende-se, de acordo com a visão vitruviana, na utilidade, firmeza e beleza do construído, sendo que a beleza, pelo mesmo autor, é descrita do seguinte modo: “... o princípio da beleza atingir-se-á quando o aspeto da obra for agradável e elegante e as medidas das partes corresponderem a uma equilibrada lógica de comensurabilidade.” (Vitruvio, 2015, p. 41). No século XVII, Sir Henry Wotton expõe o significado da tríade vitruviana por meio dos termos funcionalidade, firmeza e deleite, os quais foram por Rooth (2017) utilizados para formular reflexões sobre a essência da arquitetura. Apesar de o termo “aspeto” da transcrição acima remeter para a dimensão visual, em Rooth, o termo equivalente utilizado, “deleite”, é mais abrangente: “... deleite. Esse é o mais complexo e diverso dos componentes da arquitetura, pois envolve todos os sentidos e o modo como a arquitetura os mobiliza, como determina nossa percepção e o prazer (ou desconforto) que sentimos no ambiente construído.” (Rooth, 2017, p. 57). De facto, a atração por uma obra é função da percepção que dela se tem, sendo que a percepção da arquitetura acontece por meio dos vários sentidos, pois que esta é habitada, ao que se pode dizer, como expressa Rooth (2017), que a arquitetura se escuta.

A dimensão acústica da arquitetura não se fica pelas reflexões sobre a beleza, pois que, também em relação à utilidade, o “vazio” esculpido pela “pedra”, tornando-se palco da atividade humana (extremamente complexa em termos de sensações às quais são dados significados), deve promover campos sonoros adequados. Uma casa deve poder recolher-se dos ruídos externos, um escritório ou uma escola deve promover aos seus trabalhadores um ambiente acústico que lhes permita estar concentrados, e as salas de teatro, ópera e de concerto, devem ter como uma das principais premissas de desenho a própria configuração dos campos sonoros, pois que neles está o seu propósito, ou seja, neles está o centro da utilidade.

Boas ou más do ponto de vista acústico, todas as salas de concerto contam uma história, todas têm associadas intenções musicais e acústicas, as quais foram durante muito tempo satisfeitas (ou não) apenas com o auxílio da intuição, como é o caso da sala de ópera (bem sucedida) Festspielhaus (1872- 1876), erguida com base em desenhos do compositor Richard Wagner<sup>98</sup>, ao que depois se juntou a ajuda da descrição subjetiva e objetiva de várias componentes da experiência musical, que tomaram forma por meio de parâmetros acústicos, os quais surgiram após Wallace Clement Sabine, nos fins do século XIX e inícios do século XX, dar início ao conceito do tempo de reverberação como uma medida definidora da qualidade acústica de um espaço. A partir de 1950, outras características subjetivas foram isoladas e quantificadas objetivamente, e o desenho das salas de concerto foi- as integrando como linhas guia (Barron, 2009).

Depois de nos capítulos anteriores terem sido apurados importantes aspetos acústicos subjetivos e objetivos da experiência musical na sua relação com a arquitetura, estabelecer-se-ão neste capítulo certas relações entre a música<sup>99</sup>, com enfoque no espaço temporal compreendido entre o Barroco e os dias de hoje, e o carácter acústico arquitetónico das salas<sup>100</sup> que então foram sendo construídas, acompanhando (de modo consciente ou não) as intenções acústicas, como se fossem um instrumento musical.

## 7.1. Os espaços para a música antes do Período Barroco

Já na antiga Grécia se construíam espaços exclusivos para a performance teatral e musical, fomentando uma tipologia arquitetónica que foi evoluindo ao longo dos tempos. Os gregos construíam teatros ao ar livre em vales, longe de locais agitados e barulhentos. Escolhiam a encosta que estivesse contra o vento para o som ser levado à plateia que era em leque e com milhares de lugares (fig. 7.1).



Fig. 7.1- Teatro de Epidauro, Grécia (Tschlis, 2020)

<sup>98</sup> Este queria um ambiente acústico específico para o seu ciclo de óperas *Anel de Nibelungo*

<sup>99</sup> Suas intenções e características

<sup>100</sup> Na sua estrutura, forma, materialidade e dimensão em relação com os mesmos aspetos subjetivos e objetivos que funcionam como a ponte para o entendimento da dimensão sonora da arquitetura

Os teatros Romanos eram diferentes. Como nem sempre encontravam colinas adequadas, construíam os assentos da plateia sobre abóbadas de berço suportadas por arcadas (figs. 7.2 e 7.3) (Rooth, 2017).



Fig. 7.2- Teatro Romano, Aspendos, 155 d. C. (atual Turquia) (Apaixonados Por História, s.d.)

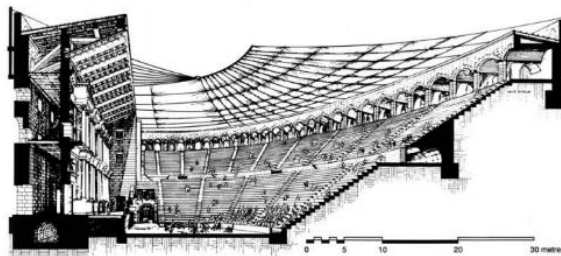


Fig. 7.3- Teatro Romano, Aspendos, 155 d. C., corte (Barron, 2009)

O anfiteatro Romano, constituído por dois teatros frente a frente, obviamente sem as *scenae frons* (cenários permanentes de vários andares) também se tornou comum, e tanto o teatro como o anfiteatro eram, por vezes, cobertos por um toldo gigante suportado por uma rede de cordas (velário) (Rooth, 2017).

Mas os dilemas acústicos estavam para nascer com os primeiros recintos fechados. A partir do Renascimento, entusiastas venezianos dos dramas gregos (outrora proibidos) queriam um edifício onde pudessem dar-lhes vida, ao que nasce, em 1580, projetado por Andrea Palladio, o Teatro Olímpico (figs.7.4-7.6). Este teatro foi coberto (com uma estrutura em treliça), adquirindo uma acústica distinta daquela dos teatros gregos abertos (Rooth, 2017). Nasceram os primeiros espaços fechados dedicados exclusivamente à arte performativa, deixando o legado para as salas ópera e, mais tarde, para as de concerto<sup>101</sup> (Michels, 2007, p. 301).

O pensador renascentista acreditaria que bons edifícios para a Música seriam originados por uma transposição direta da harmonia sonora para a dimensão visual, pois a harmonia da música reflete-se em todos os fenómenos cósmicos (Barron, 2009). De facto, as dimensões do teatro

<sup>101</sup> As salas de concerto, no decorrer da evolução da composição musical, foram-se diversificando, pois o aparecimento de novos instrumentos, novas sonoridades e estilos de composição, conduziram à necessidade de diversificação e adaptação da sua arquitetura a diversas intenções musicais e consequentemente acústicas. O resultado arquitetónico hoje em dia nestes espaços é fantástico e é um reflexo da evolução da referida intencionalidade performativa (sendo que, ao mesmo tempo, os vários repertórios também refletem o carácter acústico- arquitetónico dos espaços performativos típicos de cada época, pois “a disposição de ânimo e a razão de ser de uma época refletem-se em todas as suas manifestações”. O espaço físico em que uma época vive interfere na sua vivência e, numa composição, o “carácter sonoro” do espaço é refletido, primeiro o carácter do espaço dos instrumentos musicais propriamente ditos, e depois, o do espaço arquitetónico que os rodeia e lhes responde)

Olímpico foram derivadas de proporções de consonâncias musicais (Antunes, 2016), mas hoje sabe-se que a boa acústica dos edifícios é função de uma harmonia arquitetónica cuja possível tradução numérica é outra ou outras, concebidas com base noutros fatores, como, por exemplo, os parâmetros acústicos (Barron, 2009).



Fig. 7.4- Teatro Olímpico, perspectiva (Antunes, 2016)

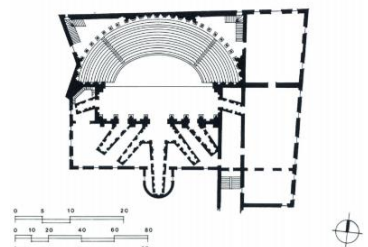


Fig. 7.5 Teatro Olímpico, planta (Rooth, 2017)



Fig. 7.6- Teatro Olímpico, corte (Rooth, 2017)

### 7.1.1. O caráter musical antes do Barroco

Até ao Barroco, as formas musicais originadas em gesto de união com a Divindade (Michels, 2007) e as que daí derivaram, como a tradicional trova da época medieval, apresentavam características rítmicas e harmónicas diferentes da música barroca (Alves 2, 2017a). Também os espaços em que as obras eram manifestadas eram outros. O Canto Gregoriano é associado às grandes catedrais da idade média, nas quais o alargado tempo de reverberação enfatiza a monodia lenta, preenchendo o espaço temporal e o físico (Barron, 2009). A polifonia sacra que surgiu posteriormente também é associada às grandes igrejas reverberantes. A técnica “organum”, por exemplo, em que uma única nota baixa (“pedal”) suporta toda a linha melódica (seja monódica ou harmónica), pede um espaço reverberante que responda ao baixo promovendo as sensações de calor e envolvimento musical. Por outro lado, a trova, que mais tarde surge na Espanha, era tipicamente cantada em pequenos espaços, como barbearias, cafés, etc, bem como ao ar livre. Na verdade tornou-se tão popular e costumeira nesses espaços que havia sempre instrumentos para que os clientes pudessem tocar enquanto esperavam a sua vez ou para animar os restantes. A trova tinha um ritmo dançante, rápido, de influência árabe,

embora, na época em que a música secular sai à rua (ca. séc. XII), já nas grandes Catedrais as composições eram diversificadas, tanto a nível melódico e harmónico, quanto a nível rítmico. Tem-se o exemplo de Perotin, compositor na Catedral de Notre Dame de Paris, que compunha música polifónica de ritmo rápido, ainda assim, muito adequada ao espaço reverberante da igreja (Alves 2, 2017a).

Em relação à música das antiguidades Grega e Romana, à excessão do Gregoriano (que surgiu pelo menos no séc. III d. C, ou seja, ainda na era romana), pouco se conhece acerca do modo como soava, pois o registo histórico da cultura musical da antiguidade e do renascimento resume-se aos textos sagrados ao serviço dos quais a melodia se desenvolve, aos próprios instrumentos musicais e aos guiões teatrais gregos, sendo que em nenhum destes casos a música era anotada<sup>102</sup> (Alves 2, 2017a; Michels, 2003). No entanto, supõe-se que, pelo facto de a performance pública ser ao ar livre, pela sonoridade dos instrumentos, e pelo contexto teatral, as músicas tradicionais tivessem também um ritmo rápido.

## **7.2. Período Barroco**

### **7.2.1. Os espaços para a música do Período Barroco**

Os espaços do período Barroco eram as Igrejas, os salões palacianos e as salas de ópera recém-nascidas. As salas de ópera de forma em ferradura são os primeiros espaços dedicados exclusivamente à performance musical, neste caso, musical-teatral, e serão o modelo para todas as salas de ópera posteriores, tornando-se a sua forma típica (fig. 1.1). A primeira sala de ópera pública foi o Teatro San Cassiano, aberto em 1637 em Veneza, uma das cidades-estados mais ricas do mundo (Alves 2, 2017a).

Outros mais foram construídos, como o Teatro Grimani a S. Giovanni Grisistomo (fig. 7.7), em 1678, no qual a orquestra colocada imediatamente à frente do palco (no fosso) esteve durante muitos anos ao nível da plateia. Esta, por sua vez, era no início desprovida de assentos e podia servir para desfiles e torneiros, sendo que, mesmo quando foram colocados assentos, era permitido estar de pé nas últimas filas. Antes a nobreza ficava nos camarotes de honra (ca. Séc. XVIII), acomodava-se em estrados na plateia. Os camarotes dispõem-se na vertical ao redor da

---

<sup>102</sup> A notação Musical em que era possível saber a altura certa da nota surgiu ca. 800 d.C pelo génio de um monge

sala, em forma de U. O proscênio era de uma decoração aparatosa e ostentava os brasões da nobreza. O palco era profundo para permitir a sobreposição de vários cenários (Michels, 2007).

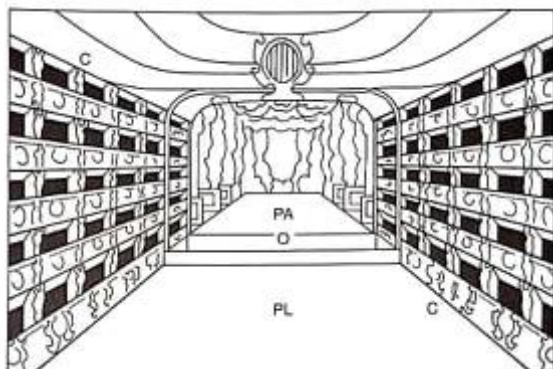


Fig. 7.7- Teatro Grimani a S. Giovanni Grisistomo (Michels, 2007)

Os primeiros teatros eram pequenos. Assim, embora fosse importante, a forma não interferia tanto na qualidade acústica quanto interfere em teatros maiores. Em Portugal, o Teatro São Carlos é um exemplo de sala de teatro/ópera (os teatros e as casas de ópera tinham poucas diferenças) em forma de ferradura, o qual foi inspirado nos teatros Alla Scala de Milão e no Teatro San Carlo de Nápoles (Barron, 2009; Centro Virtual Camões, 2020).

Outras soluções formais foram surgindo, mas a forma em ferradura é o estereótipo deste tipo de salas. Long (2006) refere que o lugar mais afastado do palco, numa ópera aceitável, não dista mais do que 30m da frente deste (embora distâncias superiores a 20 m já prejudiquem a visibilidade da cena), nem está a mais de 30 graus de abertura em relação ao canto (do palco) mais próximo. Em relação aos tempos de reverberação, o mesmo autor refere valores entre 1,2 e 1,5 s., sendo que grande parte das salas de ópera europeias estão próximas do valor mais baixo devido à relevância da inteligibilidade (uma vez que a obra se desenrole no idioma local).

Os concertos puramente musicais começam a acontecer também no período Barroco. A orquestra nasce para acompanhar óperas e bailados, e para abrir a cena (“overture”), dando origem à sinfonia. A base da orquestra eram os instrumentos de corda, sendo o resto adicional (Michels, 2007; Alves 2, 2017b). Bach, Handel e Vivaldi são importantes nomes da música barroca em cujas composições é refletida a vivência de uma época de grande inovação cultural e mesmo tecnológica. Os espaços nos quais se apresentavam estes concertos eram primeiramente as salas dos palácios ou o exterior ao ar livre, as óperas e os teatros públicos e as igrejas; a orquestra barroca era até dividida em orquestra de corte, orquestra de ópera e orquestra de igreja, sendo que toda a música instrumental da época reflete o caráter acústico destes três tipos de espaço (Michels, 2007; Alves 2, 2017b).

Os salões palacianos dão origem a um tipo particular de espaço para a música, a sala de concertos, que conhecerá um grande desenvolvimento até aos dias de hoje (Barron, 2009).

Estes salões tinham as paredes planas e ornamentadas, o que eliminava ecos flutuantes, uma vez que a música se dispersava pelo espaço. A forma retangular e relativamente estreita das salas promovia a sensação de intimidade devido ao curto intervalo de tempo entre a chegada do som direto e a da primeira reflexão (ITDG), bem como a sensação de a fonte sonora ser maior (ASW). Eram espaços muito adequados à música das pequenas orquestras da época.

### **7.2.2. O carácter musical do Período Barroco**

Na época barroca, a Música secular erudita manifestou em muito o seu esplendor na Música Litúrgica, na ópera (pela primeira vez) e, posteriormente, na música puramente instrumental. (Barron, 2009; Michels, 2007). Já no fim do século XVI a música tem um novo carácter. O usufruto das tríades, até ca. Séc. XV não inseridas por serem “imperfeitas”<sup>103</sup>, proporciona ao ouvinte uma sensação de familiaridade. A música secular é cada vez mais reconhecida e em ca. 1600, manifestações musicais eram uma “rica mistura de sagrado e secular, instrumental e vocal” (Alves 2, 2017a; Michels, 2007), com performances cada vez mais longas, durando noites, e deixando a plateia a ansiar por mais. A ópera nasce (Alves 2, 2017a). O drama e as paixões humanas eram o tema das letras e dos cenários. Também as sucessões de acordes torna-se, em muitas obras, imprevisíveis, muitas vezes dissonantes, de modo a intensificar o drama retratado nas letras. Monteverdi explora intensamente essas harmonias, primeiro nos seus madrigais e depois nas óperas. Nas suas composições as combinações dos instrumentos são novas, compreendendo sonoridades de instrumentos antigos e modernos e música coral. As personagens contavam histórias e interagem diretamente com a audiência, o que também era inédito, pois tal como a técnica musical, também a habilidade de expressar emoções inesperadas publicamente evoluiu. Monteverdi ainda aplica na ópera um efeito que havia sido “inventado” em Veneza, na igreja do palácio dos duques, São Marcos. Aqui, a tradicional cruz latina (planta baixa em forma de T) foi substituída pela cruz grega de quatro braços iguais, cada um coberto com uma cúpula (fig. 7.8). O interior era revestido por mosaicos de vidro banhados a ouro (superfície bastante dura e refletante) (Rooth, 2017). Em cada braço há galerias elevadas para o coro e então, vários coros e instrumentistas em posições diferentes podiam cantar e tocar

---

<sup>103</sup> Um intervalo de terceira tem duas versões, uma maior e outra menor, já os intervalos de quarta e de quinta são “perfeitos” constituindo por isso a base da harmonia na música polifónica até então. A introdução das tríades- acordes de dois intervalos de terceira seguidos- são a base da nova escala ocidental e do modo como a música procedente soará

alternadamente e ao mesmo tempo, fazendo o som envolver a assembleia e a celebração de modo único. O longo tempo de reverberação<sup>104</sup> ainda intensificava mais esta técnica que, para além de ser levada para as óperas de Monteverdi, foi adotada por compositores alemães como Heinrich Schutz em Munique e Johann Sebastian Bach em Leipzig (Alves 2, 2017a; Rooth, 2017).



Fig. 7.8- Igreja de São Marcos, Veneza (Rooth, 2017)

De modo geral, Monteverdi procurava máxima emoção, máximo impacto e mesmo choque, e uma narrativa clara<sup>105</sup> (Alves 2, 2017a).

A abundância e os extremos são conceitos caracterizadores desta época. A Música Barroca “...amplia as fronteiras da realidade graças a um ilusionismo fantástico. Se o Renascimento, na sua claridade era apolíneo, segundo o modelo da Antiguidade Clássica, o Barroco revela-se dionisíaco no seu impulso de sentimentos, antes do Classicismo lograr uma síntese” (Michels, 2007, p. 301). A harmonia refletida na ordem rigorosa e numérica é a base filosófica de toda a cultura, como o próprio modelo de ensino nas escolas o demonstra, tendo por base a teoria da *Música das Esferas*. A Harmonia é a força de uma época extravagante que se expressa no repertório musical. Também a música puramente instrumental executada nos salões de baile manifestava esse mesmo ilusionismo. Mas neste género, a sobreposição de várias vozes como acompanhamento umas das outras, adquirindo todas elas um papel principal que preza a clareza, promove um carácter singular à música (Michels, 2007).

---

<sup>104</sup> Hoje o RT é de seis a sete segundos, mas na altura, seria provavelmente menor devido a tapeçarias penduradas

<sup>105</sup> Como seria de esperar, os locais de apresentação das suas obras também apresentam inovações. A sua primeira ópera, *Orpheu* (1607), foi apresentada numa corte de duques diante de um pequeno público. A sua última Ópera, *A Coroação de Pompeia*, foi representada pela primeira vez num teatro Veneziano (Alves 2, 2017a)

A necessidade de todas as linhas instrumentais serem claramente percebidas é levada ao extremo no contraponto, em que várias linhas melódicas se sobrepõem.

### 7.3. Período Clássico

#### 7.3.1. Os espaços para a música do Período Clássico

As primeiras salas de concerto seguiram o modelo dos salões palacianos. A primeira nasceu em 1680 em Londres, num país onde pelo menos desde o século XV a música estava enraizada na cultura; mas a construção não ficou por aí. Com o epicentro na Inglaterra, estendeu-se para a Europa continental, começando em Hamburgo em 1761<sup>106</sup>, e espalhando sementes na Áustria, Alemanha, e tantas outras (Barron, 2009).

As salas eram pequenas, bem como as orquestras. A lotação máxima rondava os 400 lugares. Pode dizer-se que eram o que hoje se considera salas de música de câmara (Beranek, 2004; Michels, 2007).

Na Inglaterra eram famosas as salas Holywell Music Room em Oxford, de 1748, restaurada posteriormente, de 300 lugares e 1,5 seg. de tempo de reverberação (Beranek, 2004), Hanover Square Rooms<sup>107</sup> (fig. 7.9), construída por Giovanni Gallini, e para a qual Hydan compôs (entre 1791 e 1794), de teto côncavo, e dispunha de camarote real (Barron, 2009; Beranek, 2004), e Kings Theatre<sup>108</sup> (fig. 7.10) na qual Hydan também apresentou composições (entre 1794 e 1795), de planta retangular e teto plano a 10,7 m de altura (fig. 7.11) (Barron, 2009, p. 77).



Fig. 7.9- Hanover Square Rooms (Regency Reader, s.d.)



Fig. 7.10- King's theatre (Hatch, 2016)

<sup>106</sup> Nada se sabe sobre a dimensão desta sala

<sup>107</sup> Já fora de uso em 1900

<sup>108</sup> Já fora de uso em 1900

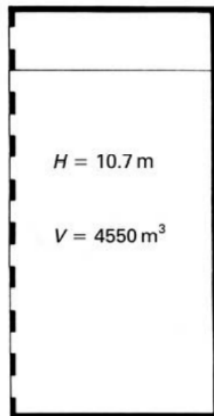


Fig. 7.11- King's theatre, Londres,  
Planta (Barron, 2009)

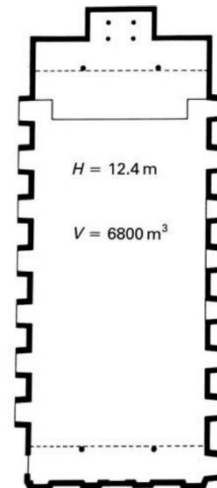


Fig. 7.12- Schloss Eisenstat,  
Áustria (Barron, 2009)

Por sua vez, na Áustria, as obras eram apresentadas em salas como as do palácio Schloss Eisenstat (fig. 7.12), para o qual Haydn compôs entre 1760 e 1765, e o grande salão de baile retangular Vienna Redoutensaal<sup>109</sup> (fig. 7.13) da casa imperial austríaca, aberto (como salão de baile) em 1752, de 400 lugares e 1,4 seg de  $RT_{mid}$  (Barron, 2009; Beranek, 2004; Rooth, 2017).

Na Alemanha, a Igreja Thomaskirche esteve associada a algumas obras barrocas de Bach, que nela dirigiu entre 1685 e 1750, como a missa em si menor e a Paixão segundo São Mateus. Não havia corte associada em Leipzig, mas, depois de várias tentativas de construir uma sala de concertos, na parte de cima da Gewandhaus (ou casa dos comerciantes de tecido (Rooth, 2017)) foi construída a Atles Gewandhaus (fig. 7.14) (que permaneceu em Leipzig entre 1780 e 1894), de 400 lugares e 1,3 seg de RT (Barron, 2009; Beranek, 2004).

De entre os expoentes arquitetônicos mencionados, é de destacar as salas para as quais Haydn compôs. Meyer (1978, citado por Barron, 2009) fez um estudo sobre a influência da acústica nas primeiras obras de Haydn, escritas para Schloss Eisenstadt (Áustria, 1760–65), Schloss Esterháza, em Fertöd (Hungria, 1766–84)<sup>110</sup>, para Hanover Square Rooms (1791–94) e King's Theatre (1794–95). Todas estas salas eram retangulares, quase sem varandas, e sem inclinação na audiência. Os tetos, à exceção do de Hanover Square Rooms (abobadado), eram planos. Os volumes variavam de 1530 m<sup>2</sup> a 6800m<sup>2</sup>, e os tempos de reverberação entre 1.0 e 1.7seg. A sensibilidade de Haydn à acústica era expressa nas suas composições. Para o Theatre King,

<sup>109</sup> No qual o arquiteto da primeira "grande" sala de concertos da Áustria, a Musikvereinsgebaude (1867- 1870), se inspirou, aumentando em 12 % as suas dimensões para ir de encontro aos requisitos funcionais das orquestras, que já eram maiores

<sup>110</sup> Barron (2009) menciona que ambas as salas, Schloss Eisenstadt, na Áustria e Schloss Esterháza, na Hungria se mantêm conservadas

Haydn tira partido do longo (em comparação às outras) RT para dar um caráter místico à música, o que pode ser comprovado através do primeiro movimento da sinfonia 102, em que um compasso silencioso separa uma passagem *fortíssimo* de outra *piano* que a sucede. Por outro lado, a acústica da sala mais pequena, Esterhaza, de pequeno RT, é expressa na sinfonia nº 61, primeiro movimento, em que um compasso em *forte* é seguido imediatamente por uma rápida linha melódica *piano* para os violinos, a qual, num espaço muito vivo, seria mascarada pelo *forte* que a precede. Meyer (1978, citado por Barron, 2009) menciona ainda a sensibilidade do compositor em relação às características acústico arquitetónicas de espacialidade, que é, na sinfonia 102, logo no início, expressa por meio de uma passagem em *piano* seguida de um *crescendo* que, ao atingir um clímax, “desmaia” (com um diminuendo), o que exige um jogo de primeiras reflexões laterais que promovam tanto a sensação de que a fonte sonora se “alarga” (ASW), para depois voltar a diminuir, quanto uma boa resposta à dinâmica orquestral.

Para além destas, são de destacar as referidas Atles Gewandhaus, na Alemanha<sup>111</sup>, e o Redoutensaal na Áustria<sup>112</sup>, pois que a arquitetura dessas salas viria a ser a mãe das grandes salas Neues Gewandhaus e Musikvereinsaal, respetivamente. Relativamente ao Neues Gewandhaus, os arquitetos deixaram as seguintes intenções “with reference to the acoustics, ... the client intended that the form should duplicate the old hall with its highly regarded reputation” (Gropius & Schmieden, 1887, citado por Barron, 2009, p. 83), enquanto que o arquiteto do Musikvereinsaal de Viena deixou visível o seu propósito adotando a proporção da velha sala, mas aumentando todas as dimensões em 12%.



Fig. 7.13- Redoutensaal, Viena (Korom, 2020)

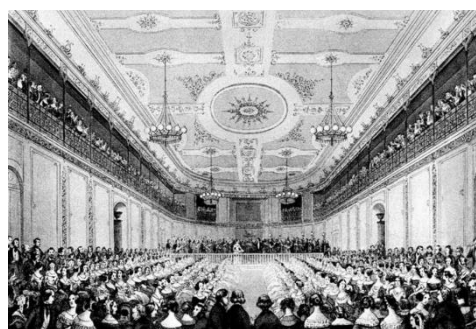


Fig. 7.14- Atles Gewandhaus, Leipzig (Barron, 2009)

<sup>111</sup> Especialmente famosa na época em que Mendelsohn lá dirigiu, entre 1835 e 1847

<sup>112</sup> Palco da estreia da oitava sinfonia de Beethoven em 1814

O Atlas Gewandhaus tinha longos bancos paralelos às paredes laterais, promovendo o contacto visual entre as pessoas<sup>113</sup>. O volume de 1800 m<sup>3</sup> e o RT (com a sala ocupada) de 1,2 segundos eram condições ótimas para recitais, embora o espaço viesse a ficar conhecido como a sala de concertos de Leipzig. A acústica era considerada excelente, e era atribuída a fatores que hoje se conhece serem mitos. A planta tinha os cantos curvos, o teto era plano com alguma ornamentação e margens côncavas. Havia madeira nas superfícies, pois acreditava-se que o material atuava como ressonador que amplifica o som, quando, na verdade, os painéis absorviam as baixas frequências (ver secção 6.5.1). Os camarotes nas superfícies curvas dos cantos preveniam possíveis ecos que poderiam surgir da forma (Barron, 2009).

Mas novas correntes iam em direção à ribalta. As orquestras cresciam, e, a par, crescia o público, cresciam os espaços, e diversificavam-se os efeitos sonoros alcançados pelos instrumentos musicais, como o piano, que alcançava uma capacidade de dinâmica maior através do *touché* (Michels, 2007).

Havia-se estabelecido uma cultura em que as audições públicas se popularizavam, e correntes românticas começavam a fazer-se notar na música, com Beethoven como expoente de transição entre o classicismo e o romantismo (Barron, 2009; Beranek, 2004; Michels, 2007).

### **7.3.2. O caráter musical do Período Clássico**

As obras clássicas revelam um novo naturalismo, o iluminismo impele ao progresso, a uma síntese, ao invés da extravagância e do excesso. Agora, já não são melodias que acompanham as melodias, como no contraponto. Agora, uma linha melódica é acompanhada por acordes que funcionam como pilares.

Leonard Bernstein explica em *Joy of Music* (citado por Simoon & Schuster, 1959, p. 232- 233, citado por Beranek, 2004, p. 11)

*Counterpoint is melody, only accompanied by one or more additional melodies, running along at the same time. ... (T)his Music is difficult for us to listen to. ... Today, we are used to hearing melody on top with chords supporting it underneath like pillars- melody and harmony, a tune and its accompaniment.*

Mas, tal como as primeiras salas de concerto herdaram os princípios arquitetônicos formais e materiais das salas palacianas, também a música clássica aporta em si características semelhantes às da música barroca. A clareza musical em todas as linhas é ainda muito

---

<sup>113</sup> Experiência que mais tarde vai voltar a surgir, de modo mais subtil, nas salas em terraço, entre outras

importante, apesar de haver uma voz que sobressai<sup>114</sup>. Este balanço entre clareza e reverberação a enfatizar uma voz principal é expresso nas qualidades acústicas destas salas.

Deste modo, as grandes salas de concerto da segunda metade do século XIX (que surgem sob uma influência acústica clássico-romântica), não só por influência visual das salas de baile, mas pelo apoio acústico que a sua conceção formal e material comprovadamente proporcionava ao repertório antigo e em transição, eram intuitivamente construídas de forma aproximadamente retangular, ornamentadas e com proporções de duplo cubo, 1:1:2 (Barron, 2009; Beranek, 2004; Michels, 2007).

Musikvereinssaal, na Áustria e Neues Gewandhaus em Leipzig (destruído na 2ª guerra mundial) foram construídas num período em que o Romantismo ganhava força. Aliás, era já a época do romântico tardio, o tempo de Liszt, Chopin, Shumann, e outros, o que significa que a demanda de público, bem como a musical, exigia volumes maiores e tempos de reverberação mais longos, o que foi em pleno satisfeito na Musikvereinssaal, onde ainda hoje grandes grupos sinfónicos atuam, formulando positivas críticas. Não obstante, a nível formal nenhuma destas salas é ainda audaciosa como outras suas contemporâneas, por meio das quais quase se infere a existência de uma tentativa de transpor na dimensão visual da arquitetura a dinâmica mais livre do som. Ao invés, o desempenho acústico das referidas salas clássicas de Viena e Leipzig, ainda é comandado pela simplicidade geométrica e pela organização e hierarquização das salas palacianas (Barron, 2009; Beranek, 2004; Michels, 2007).

Beethoven traz nas mãos o furor do romantismo. As orquestras cresciam e, para além disso, a afluência de público era maior, o que conduz a salas maiores e novas sensações de reverberação, clareza e envolvimento (Beranek, 2004; Michels, 2007).

### **7.3.3. Casos de referência**

#### **7.3.3.1. Musikvereinssaal**

A Musikvereinssaal, aberta em 1870 pela Sociedade dos Amigos da Música (“Gesellschaft der Musikfreunde” (Barron, 2009, p.80)), em Viena, na Áustria, é descrita em Beranek (2004) como a Mecca das antigas salas de concerto da Europa (figs. 7.15, 7.16). Projetada (juntamente com

---

<sup>114</sup> Os pianistas podem controlar a sensação de reverberação de um modo que outros músicos não conseguem, devido ao pedal de sustentação, e então, é possível observar na técnica pianística alguns requisitos de diferentes repertórios. Por exemplo, sonatas de Mozart têm de ter uma limpeza de pedal muito mais rígida do que os nocturnos românticos de Chopin, e mais subtil do que as fugas contrapontísticas de Bach

uma outra sala no mesmo edifício) por Theophil Ritter von Hansen, a nova sala tem as dimensões do antigo Redoutensaal aumentadas em 12% (Barron, 2009; Beranek, 2004; Rooth, 2017).

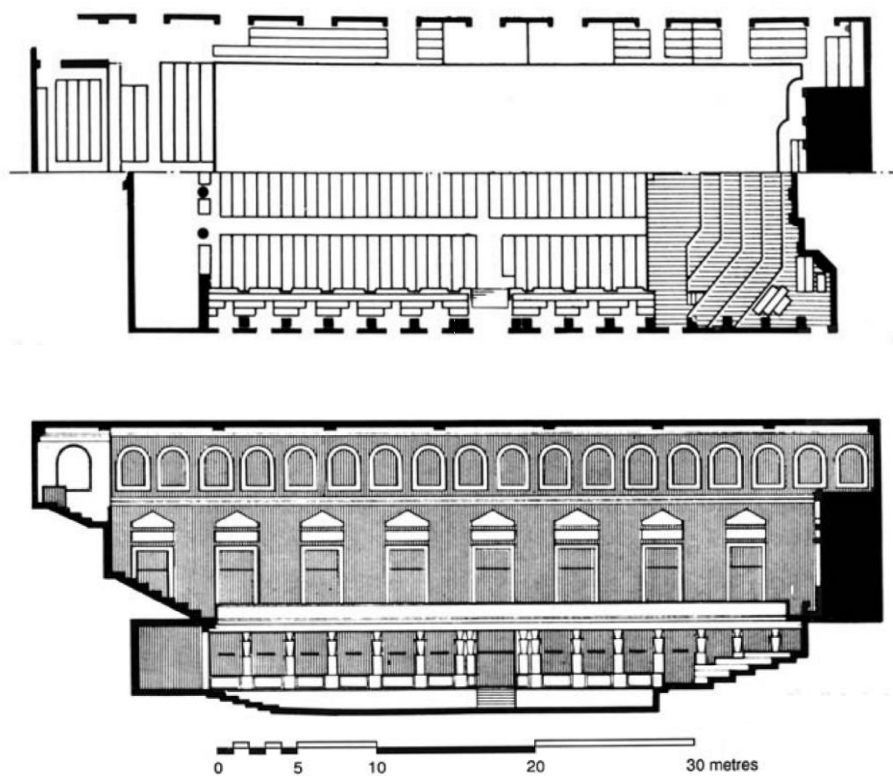


Fig. 7.15 – Musikvereinsaal, Viena. Planta e corte (Barron, 2009)



Fig. 7.16 – Musikvereinsaal, Viena. perspectiva (Musikverein, 2020)

### **a) Forma**

A sala retangular tem cerca de 40 janelas junto ao teto, vinte portas acima da varanda e, abaixo, trinta e duas estátuas douradas. A rica ornamentação cria um campo difuso (o que justifica a semelhança entre o EDT e o RT) propício a importantes qualidades acústicas, como envolvimento e reverberação (Barron, 2009). O teto alto permite que, mesmo com a sala ocupada, a energia sonora permaneça por cerca de dois segundos após um instrumento parar de tocar, aumentado ligeiramente nas frequências baixas, o que justifica a sensação de calor. Das suas modestas dimensões (15000 m<sup>3</sup> e 1680 lugares) e adequada geometria, ergue-se um instrumento musical gigante que responde à orquestra conduzindo o som a todos os lugares com qualidade e enfatizando uma tal sensação de intimidade (ITDG de 12 ms., o que se justifica pela estreita dimensão entre as paredes laterais). A configuração da sala, através das paredes perpendiculares ao perfil transversal da plateia, que refletem o som lateralmente ao ouvinte (índice BQI favorável), promove também o atributo caracterizado pela aparência do tamanho da fonte (Barron, 2009; Beranek, 2004).

### **b) Materialidade**

A Musikvereinsaal comprova que a abundância de madeira como revestimento não é essencial ao conforto acústico, sendo que aqui, a mesma constitui menos de 15 % do material utilizado. Para além do pavimento, a madeira encontra-se apenas nas portas, ao redor do palco e nas guardas. O resto das superfícies ergue-se em gesso sobre tijolo ou, no caso do teto e das frentes das varandas, em gesso sobre madeira. Os assentos do piso principal e das varandas laterais são em madeira e as bases das cadeiras são cobertas por almofadas de 10 cm de espessura revestidas por tecido poroso. Os assentos da varanda de trás são de madeira compensada (Barron, 2009; Beranek, 2004).

### **c) Usos e comentários**

Para música sinfónica dos períodos Clássico e Romântico, esta sala é excelente. Comentários como o de uma flautista: *“The great thing about this hall is that you can make magic happen. You can risk a pianissimo and be rewarded. It’s worth going to extremes.”* (Schwaabe, s.d.) demonstram a sua qualidade. No entanto, para ensaios, a sala sem audiência pode tornar-se

demasiado reverberante, o que não favorece a clareza que as orquestras por vezes precisam para se corrigirem e aprimorarem os pormenores. Herbert Von Karajan comentou:

*The sound in this hall is very full. It is rich in bass and good for high strings. One shortcoming is that successive notes tend to merge into each other. There is too much difference in the sound for rehearsing and the sound with audience*

(Beranek, 2004, p.174)

Muitos também consideram que a fiel resposta às passagens em *forte* nesta sala pode ser uma desvantagem para orquestras de fora, pois que terão de tocar mais suavemente<sup>115</sup>. Beranek (2004) menciona que instrumentos como os metais e a percussão dominam facilmente sobre as cordas, embora estas últimas, juntamente com os sopros como as flautas, obtenham um tom sublime na sala.

A sala foi renovada em 1911 por questões de segurança contra incêndios, mas logo a deixa foi aproveitada para aumentar a área útil, recuando as estátuas do piso principal (que outrora seguravam as frentes das varandas) para o alinhamento das paredes, entre outras medidas (Barron, 2009).

### **7.3.3.2. Neues Gewandhaus**

Em Leipzig, na Alemanha, apesar de 170 lugares em galerias laterais terem sido acrescentados ao antigo Atles Gewandhaus, a crescente popularidade dos concertos públicos conduzia mais e mais público às salas e as modestas capacidades do salão não chegariam para acolher tantas pessoas. Então, uma nova sala de concertos, projetada por Martin Gropius e Heinrich Schmeiden, abre ao público em 1884, o Neues Gewandhaus, com lotação de 1560 pessoas (fig. 7.17 e 7.18) (Barron (2009), Beranek (2004), Rooth (2017)). Devido à boa reputação acústica do Atles Gewandhaus, o cliente pretendia que a nova sala lhe fosse igual mas com o dobro do tamanho (Barron, 2009).

---

<sup>115</sup> Beranek (2004) refere que a força sonora nesta sala é maior que em Boston Symphony Hall

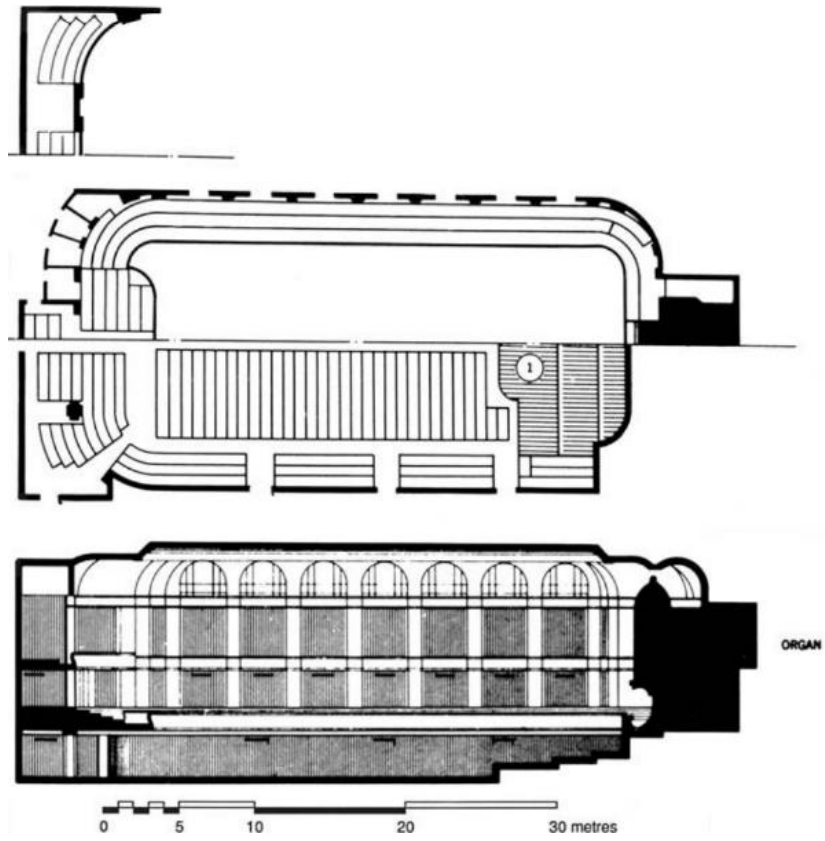


Fig. 7.17- Neues Gewandhaus, Leipzig, Plantas e corte (Barron, 2009)



Fig. 7.18- Neues Gewandhaus, perspectiva (Gewandhaus Orchester, 2020)

### **a) Forma**

De facto, a forma do novo recinto seguiu a do antigo, ou quase. Em planta, o aumento das dimensões foi proporcional, mas certos detalhes não foram mantidos. Os cantos não tinham uma curvatura tão pronunciada e a parede traseira foi fragmentada e tratada com material absorvente para evitar ecos. As paredes laterais também foram tratadas de modo a evitar ecos flutuantes. As margens curvas do teto desta vez foram intersetadas por janelas. A ornamentação era abundante, tanto no teto quanto nas paredes, o que sugere um bom campo difuso. No entanto, a sensação de envolvimento para música romântica tardia fica aquém, embora os 1,55 s. de reverberação fossem adequados à música do período clássico e a um romântico inicial (Barron, 2009).

Um longa varanda e camarotes por detrás destas rodeiam a sala (Barron, 2009).

### **b) Materialidade**

À semelhança do atles Gewandhaus, caixas de madeira foram utilizadas para amplificar o som por ressonância, embora, como já foi referido, esse sistema absorva as baixas frequências (Barron, 2009).

### **c) Usos e comentários**

A Neues Gewandhaus, bem como a Atles Gewandhaus, foram destruídas e uma nova abriu ao público em 1981. Hoje em dia, a nova Gewandhaus é a casa de muitos concertos em Leipzig. Não obstante, ficou na memória a famosa acústica da Neues Gewandhaus, embora observações atuais lhe apontem muitas falhas. No entanto, permanecem descrições como esta de Bagenal e wood (Bagenal e Wood, 1931, citado por Barron, 2009, p. 84):

*The Gewandhaus is a true instrument to music produced within it. ... There is no exaggeration in its reputed excellence for orchestral music. ... Tone is both 'full' and 'bright' and at the same time notes are distinct. ... To hear indeed the highly trained Leipzig orchestra in the Ninth Symphony, each phrase exactly presenting itself to the ear for the fraction of a second before it is resolved in the great onrush of the scherzo, to feel the control of sheer loudness maintained by the conductor, is a musical experience of considerable interest to the student of acoustics.*

## **7.4. Período Romântico**

### **7.4.1. Os espaços para a música do Período Romântico**

A obra de Beethoven marca a transição entre o clássico e o Romântico. As características do seu trabalho são ainda clássicas mas evidenciam uma clara ruptura que iria manifestar-se nas dimensões e formas arquitetónicas das salas de concerto nos 150 anos seguintes (Beranek, 2004). Musikvereinssaal e Neues Gewandhaus foram apenas duas das grandes primeiras salas de concerto a ser construídas na Europa. Durante o século XIX este tipo de recinto ia adquirindo formas mais e mais arrojadas e audaciosas. O ideal de Berlioz era uma sala para 10 000 músicos e 20 000 espectadores. Muitas salas enormes e curvas foram construídas na Inglaterra, algumas com tempos de reverberação que apenas se adequam a música organística, mas o maior auditório que sobrevive é o Royal Albert Hall em Londres, de 1871 (Barron, 2009).

### **7.4.2. O carácter musical do Período Romântico**

Em muitos aspetos o romantismo e o classicismo não podem ser divididos em duas épocas, porque não há ruptura na linguagem, nem na harmonia, nem nos géneros do período clássico, mas o romântico acrescenta um carácter metafísico e poético. O sentimento e a emoção, a expressão do eu individual, fazem evoluir a técnica de execução e a sonoridade (surgem novos instrumentos) (Michels, 2007).

*“o mundo deve ser romantizado. Assim voltará a encontrar o sentido original. Ao outorgar ao comum um sentido elevado, ao habitual uma aparência enigmática, ao conhecido a dignidade do ignorado, e ao finito um aspeto infinito, estou a romantizar”* (Novalis, 1798, citado por Michels, 2007 p. 437).

Este excerto, escrito no início de uma primeira fase do romantismo (na literatura alemã) expressa muito bem o carisma de todo o repertório romântico. O mistério do eu mais profundo caracteriza toda uma época. Agora a linha melódica é suportada por uma harmonia “cheia” como fundo que, para além de a acompanhar, a engrandece. A música romântica pede um grande tempo de reverberação, da ordem dos dois segundos, pois que o carácter místico exige uma envolvimento particular das harmonizações.

### 7.4.3. Casos de Referência

#### 7.4.3.1. Royal Albert Hall

Royal Albert Hall (figs. 7.19; 7.20), projetado por Francis Fowke<sup>116</sup> e Col. Scott<sup>117</sup>, herda o nome do príncipe Albert, falecido amado da rainha Vitória<sup>118</sup>, e, aquando da sua inauguração, em 1871, torna visível um dilema acústico que constituirá cem anos de tentativas de supressão de ecos maiores vindos da cúpula (originalmente em vidro e posteriormente coberta por placas de metal). A partir de então, foi notável que uma sala elíptica, de dimensão audaciosa, e com uma cúpula, é um design arriscado em termos de acústica. Em 29 de Março de 1871, o discurso do príncipe de Wales era repetido pela própria sala, o que, quase alcançando um efeito cómico, não promovia uma boa inteligibilidade, e não promoveria, por certo, uma boa experiência musical. O projetista da estrutura da cobertura, Col. Scott, logo abordou o problema colocando um enorme velário de tecido esticado de 1136 Kg, o qual permaneceu até 1949. No entanto, nos anos 20, as queixas continuavam, e os ecos cada vez perturbavam mais. Há até quem atribuisse esse facto às novas camisas (mais refletantes) do vestuário masculino. De 1968 a 1970 o problema do eco foi atenuado por meio de 134 discos suspensos ao nível do teto da galeria, e, em 1996, aquando de obras subterrâneas das vias de acesso e carregamentos, bem como de melhorias nas instalações dos bastidores, a acústica foi estudada por Peutz & Associates (Metkemeijer, 1997- 2002, citado por Barron, 2009) numa maquete 1:12. Em 2003 o trabalho foi completo e as alterações visivelmente mais notáveis consistiram no arranjo dos discos (Barron, 2009; Beranek, 2004). Em 2017 foram levadas a cabo algumas intervenções mas em ordem à integração de um sistema eletrónico de apoio acústico.



Fig. 7.19- Royal Albert Hall, Londres (Almeida, 2020)

<sup>116</sup> Francis Fowke faleceu durante o processo projetual, em 1865

<sup>117</sup> Col. Scott precedeu Fowke, continuando sob a supervisão de uma equipa de conselheiros

<sup>118</sup> O edifício era para ser chamado Central Hall of Arts and Sciences

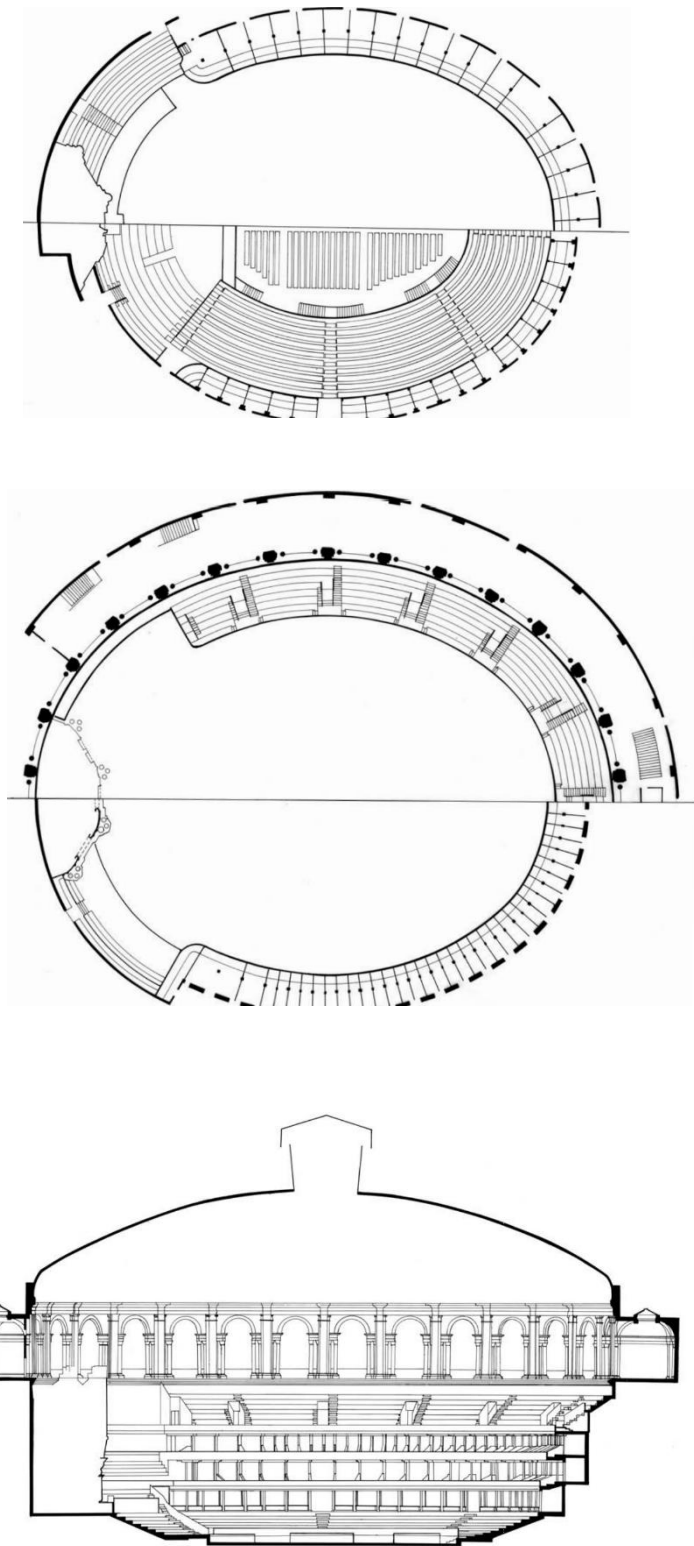


Fig. 7.20- Royal Albert Hall, Londres. Plantas e Corte Longitudinal (Barron, 2009)

### **a) Forma**

Em planta, a sala é aproximadamente elíptica de eixos 47 x 44.5 m (a profundidade é medida entre a frente do palco e a média das posições da parede do fundo em todos os níveis). A cúpula, a cerca de 36 m de altura, cobre 5 níveis de assentos para 5222 pessoas, sem contar com 500 lugares de pé das galerias. Os discos convexos suprimem praticamente os ecos, embora em alguns registos mais agudos de alguns instrumentos, devido à diretividade, a energia sonora possa encontrar caminhos que os originem, mas é difícil. Barron (2009) diz que antes da instalação dos discos, em alguns sítios (possivelmente os mais afastados) o nível do eco era cerca de 3dB maior que o nível do som direto, e chegava com 1/6 de segundo de atraso. Para além de combaterem os ecos, os discos, como são convexos, também contribuem para a melhor distribuição do som pela sala, o que, juntamente com o longo tempo de reverberação, promove a sensação de envolvimento sonoro, sobretudo nas varandas (Barron (2009) refere que no piso principal a sensação de reverberação é inferior ao esperado, já nas varandas, as superfícies perto dos assentos propiciam uma rica sensação de espacialidade). O elevado tempo de reverberação (2,4 segundos) não parece afetar a clareza musical agora que os dispositivos de reflexão suspensos orientam as primeiras reflexões diretamente para o público, que as absorve, dando origem a um baixo EDT<sup>119</sup>. Um aumento do RT nas frequências baixas promove a sensação de calor. Por outro lado, a forma da sala dificulta a experiência relativa à sensação de que a dimensão da fonte aumenta, pois, apesar dos discos sob a cúpula, bem como do canópio sobre o palco e piso principal, compensarem a falta de superfícies próximas dos espectadores, não direcionam o som lateralmente. O que também não é de surpreender é a falta de apoio ao nível sonoro produzido pela orquestra numa sala tão grande, embora em Barron (2009) seja descrita uma boa resposta à dinâmica orquestral (*“the transition during crescendos is extremely smooth with no sense of constraint”* (Barron, 2009, p. 135)), bem como uma uniformidade da força sonora em todos os lugares, a qual se deve à cautelosa inclinação dos refletores sobre o palco. No entanto, deve ter-se em mente que essa uniformidade não compensa a fraca resposta da sala ao nível sonoro produzido pelos instrumentos, ao que, apenas não permite que a falta seja mais agravada em lugares mais afastados do palco, sendo que a força sonora, à exceção de um lugar, desce abaixo do critério dos 0 dB, o que se deve à absorção por parte da enorme área acústica e dos absorventes colocados na face superior dos discos suspensos com o fim de reduzir o tempo de reverberação que outrora era exageradamente alto nas médias frequências. Este

---

<sup>119</sup> O que explica o que antes se referiu acerca da sensação de reverberação no piso principal

facto (referente ao nível sonoro), segundo a perspectiva de Barron (2009) sobre o parâmetro, prejudica a sensação de intimidade, apesar dos discos reduzirem o ITDG. O nível sonoro apenas pode ser assistido por tecnologia eletroacústica.

### ***b)Materialidade***

Inicialmente a cúpula era em vidro, tapada com um velário (que foi colocado com a intenção resolver os problemas de ecos) (figs. 7.21 e 7.22). Em 1941, aquando da destruição do Queen`s Hall, os concertos de Verão passaram para o Royal Albert Hall, que logo teve de se adaptar a concertos sinfónicos, ao que se descobriu que o velário a um nível mais baixo melhoraria a acústica da sala, mas logo se optou por colocar um refletor sobre o palco. Depois da guerra, o velário foi retirado, e, enquanto isso, foi instalada uma segunda cúpula no interior, de placas de alumínio canelado forradas a lã mineral. Este sistema funcionava melhor como absorvente mas não era eficaz em toda a faixa de frequências, ao que ainda ocorriam ecos. De 1968 a 1970 foram introduzidos discos suspensos constituídos por plástico reforçado com fibra de vidro, sendo que, finalmente, o problema dos ecos foi atenuado. Sobre os discos foi colocado 3,8 cm de manta de fibra de vidro (coberta com 0.04 mm de filme de plástico) para absorver energia nas frequências médias, nas quais o RT era muito elevado, bem como para eliminar possíveis reflexões vindas da cúpula. O canópio sobre o palco também é de plástico reforçado com fibra de vidro. Sobre as varandas, o teto constitui-se por gesso diretamente sobre a estrutura. As paredes também são revestidas a gesso diretamente sobre a estrutura, embora a parede traseira dos camarotes seja revestida por madeira fina. O pavimento do piso principal é constituído por madeira de 2.5cm de espessura sobre estrutura de madeira. Sobre o mesmo é comum estenderem-se carpetes. O chão dos camarotes também é revestido por madeira, enquanto que o das varandas é de betão. No palco, o pavimento compõe-se de madeira sobre espaço vazio (para amplificar o som nos registos graves dos instrumentos que sobre ele apoiam diretamente). No piso principal, bem como nos camarotes, as cadeiras (de estrutura em madeira) são parcialmente forradas a tecido<sup>120</sup>, e, enquanto isso, nas varandas, as cadeiras estofadas são rebatíveis. Embora as galerias concedam 500 lugares em pé, dispõem de cerca de 300 cadeiras (de madeira) (Barron, 2009; Beranek, 2004).

---

<sup>120</sup> Nos camarotes as cadeiras são soltas

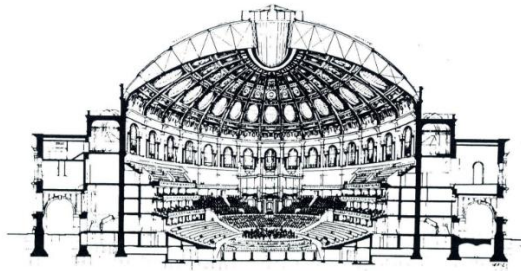


Fig. 7.21- Royal Albert Hall, Londres, Corte da sala com a cúpula de vidro (Rooth, 2017)

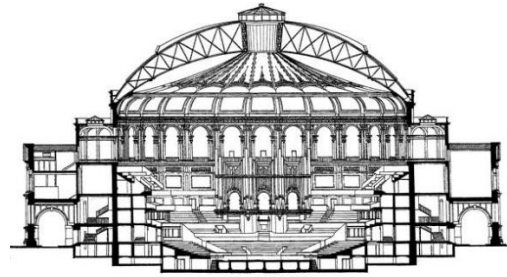


Fig. 7.22- Royal Albert Hall, Londres, Corte da sala com o velário (Arad, 2011)

### **c) Usos e comentários**

A sala seria construída como um tributo às artes e às ciências e ainda hoje serve para múltiplas atividades das mais diversas áreas, como desporto (sobretudo boxe), reuniões, exposições, bailes e concertos. Inicialmente, a sala não recebeu muitos elogios devido à sua acústica. No dia a seguir à apresentação do príncipe de Wales, o comentário no *The Times* foi o seguinte:

*The address was slowly and distinctly read by his Royal Highness, but the reading was somewhat marred by an echo which seemed to be suddenly awake from the organ or picture gallery, and repeated the words with a mocking emphasis which at another time would have been amusing*

(The Times, citado por Barron, 2009, p. 134).

Mas as renovações posteriores iriam fazer toda a diferença. Em Beranek (2004) é descrita a seguinte experiência:

*I heard Tchaikovsky's 1812 Overture There. The great organ sounded out at the climax and the cannon boomed forth. The chimes clanged loudly through their part and, finally, in combination with the military fanfare theme, the Russian Imperial Anthem thundered forth. The general reverberation swelled with the increased vigor of the composition. Above all the great organ sounded like the voice of Jupiter. The audience was left breathless and tingling. It is for these moments of ecstasy that Albert Hall continues to exist*

(Beranek, 2009, p. 242)

Do mesmo modo, Barron (2009) menciona *"It is regularly used for large-scale performances, an ideal location for such spectacles as Tchaikovsky's 1812 Overture. In this and grand choral works the space really comes alive, but at the smaller scale the impact can be dull."*

Beranek (2004) refere que a sala tem tido sucesso na apresentação de concertos populares (proms), com audiências com mais de 4000 pessoas.

#### **7.4.3.2. Outras salas do século XIX**

Durante a segunda metade do século XIX outras importantes salas foram erguidas, algumas de dimensões e formas mais audaciosas do que outras. Destaca-se a Concertgebouw, em 1888, em Amsterdão, considerada por muitos uma das melhores salas do mundo, e outras, como Queens Hall (destruída em 1941), Boston Music Hall (agora Orpheum Theatre), etc..., que marcam os centros de atividade cultural de grandes cidades europeias e americanas (Barron, 2009).

No entanto, por melhores que fossem as salas clássicas, não haviam sido construídas com base em modelos acústicos mesuráveis (como os parâmetros estudados no quarto capítulo deste trabalho) que permitissem prever a qualidade acústica, sendo que se apoiavam apenas na intuição e nos testemunhos arquitetónicos antecedentes. Charles Garnier, o arquiteto da ópera de Paris mostrou-se muito desmotivado com o desenvolvimento da acústica aplicada na arquitetura:

*It is not my fault that acoustics and I can never come to an understanding. I gave myself great pains to master this bizarre science, but after fifteen years' labour, I found myself hardly in advance of where I stood on the first day. ... I had read diligently in my books, and conferred industriously with philosophers – nowhere did I find a positive rule of action to guide me; on the contrary nothing but contradictory statements*

(Garnier, 1880, citado por Barron, 2009 p. 5).

No entanto, uma luz havia de surgir às mãos de Wallace Clement Sabine, que, cerca de quinze anos após a queixa de Garnier, começaria um intensivo estudo para melhorar a acústica da sala de leitura do Fogg Art Museum. Sabine logo isolou a sensação de reverberação como um importante parâmetro acústico, e desenvolveu uma técnica para a quantificar, a qual consiste em nada mais do que medir, através de um relógio e bons ouvidos, o tempo que o som permanece no espaço, bem como um modelo matemático para a prever a partir dos desenhos. Conseguindo melhorar as condições acústicas da sala, Sabine foi convidado pelo escritório Mc Kim, Mead e White para consultar sobre a fiabilidade acústica do projeto da nova sala de Boston, a qual haveria de tornar-se um importante marco na história das salas de concerto, por ser a primeira a ser construída com base na ligação objetiva entre um parâmetro acústico e as configurações arquitetónicas (Barron, 2009; Beranek, 2004; Rooth, 2017).

#### **7.4.3.3. Boston Symphony Hall**

Boston Symphony Hall (figs. 7.23 e 7.24) marca o início de uma nova era na construção de salas de concerto, e sobrepõe-se ao início de uma nova era musical que estava a despontar,

caracterizada pela variedade de repertórios musicais antigos e recentes que culturalizariam o século XX. No entanto, a preocupação relativamente à acústica ainda se concentrava nos requisitos românticos, o que é prudente, visto que, por exemplo, em relação ao RT, pode dizer-se que é mais fácil preparar uma sala com um longo RT para repertório romântico de uma orquestra de 100 membros e, quando necessário, baixar tapeçarias que o encurtem para recitais, do que preparar um ambiente acústico seco para depois vir a acolher peças sinfónicas de Brahms ou Tchaikovsky. A arquitetura da sala de Boston vai de encontro àquela das salas clássicas de Vienna e Leipzig, porém, com muito mais lugares, o que conduziu a uma pequena área por pessoa, para que não se distorcessem as proporções ideais, nem se ultrapassassem certos valores de RT, o que resultou muito bem, pois a sala é uma referência no mundo da acústica arquitetónica.

Henry Lee Higgings, o principal patrocinador da orquestra Sinfónica de Boston, e o escritório de arquitetura McKim, Mead e White, deram os primeiros passos na construção da nova casa da orquestra. Porém, em 1894, o projeto foi interrompido por uma crise económica, o que acabou por ser benéfico, pois quando o escritório de arquitetura finalmente o retomou, Sabine já tinha iniciado os seus estudos em acústica, e no outono de 1898, a equipa que trabalhava na nova sala convidou-o a consultar. Sabine, hesitante, dedicou-se a uma revisão dos dados acústicos obtidos em várias salas de Harvard, ao que acabou por estabelecer uma relação de proporcionalidade direta entre a reverberação e o volume da sala e uma relação de proporcionalidade inversa entre a reverberação e a absorção, originando a famosa fórmula de Sabine. Tendo a fórmula como ferramenta para intervir como consultor, aceitou o convite (Barron, 2009; Beranek, 2004 e Rooth, 2017).



Fig. 7.23- Boston Symphony Hall, Boston. Perspetiva (Berkshire Choral International, 2020)

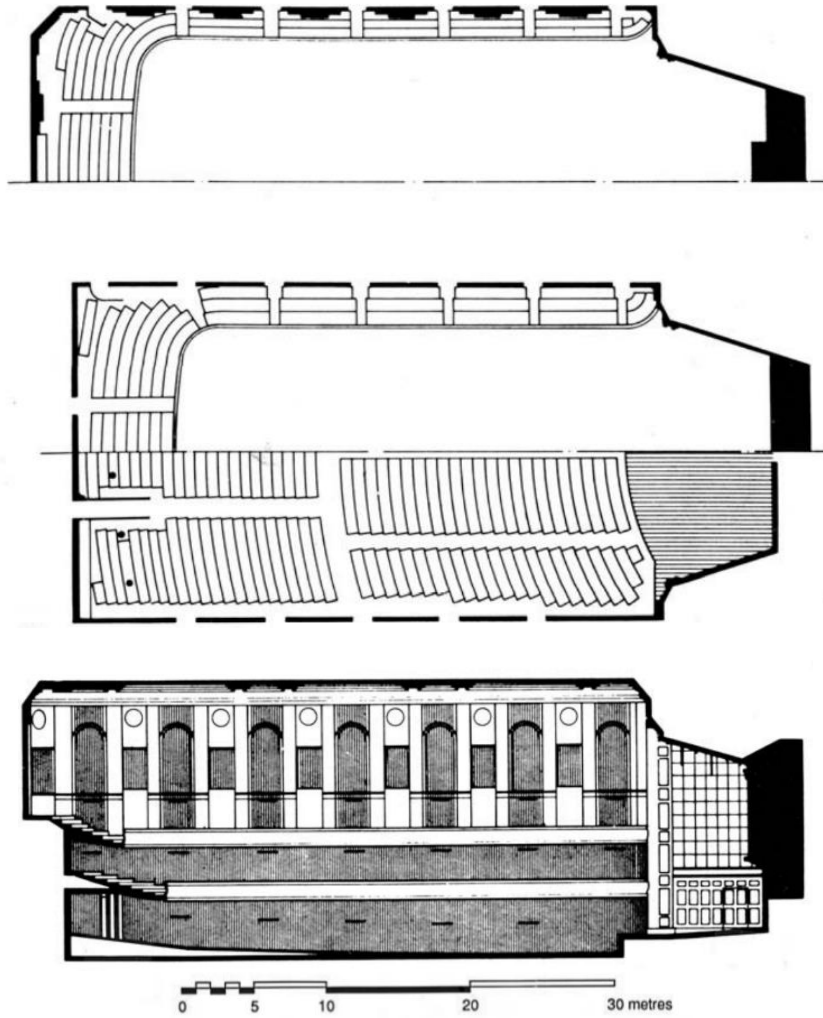


Fig. 7.24- Boston Symphony Hall, Boston. Plantas e Corte Longitudinal (Barron, 2009)

### **a) Forma**

Higgings havia instruído os arquitetos a projetar o Boston Symphony Hall tendo como modelo o Neues Gewandhaus (que contava 1560 lugares), mas aumentado em quase 50% para acolher 2600 espectadores (atualmente a lotação é de 2625 lugares, reduzindo para 2369 para concertos de pop). Sabine objetou com o argumento de que tal dimensão para a sala iria conduzir a uma exagerada reverberação, a menos que uma grande quantidade de material absorvente fosse aplicada, o que conduziria a fracas sensações de calor, brilho, intimidade e espacialidade, bem como a uma pobre resposta por parte da sala à dinâmica orquestral. A outra sala que poderiam usar como referência seria o Boston Music Hall, de 1863 (agora Orpheum Theatre), com 2361 lugares. No entanto, Sabine também não apreciava muito este recinto: *“the old Music Hall was not a desirable model in every respect, even acoustically”* (Sabine, 1922, citado por Barron, 2009, p. 89). Em comparação com este último, o Boston Symphony Hall adotou uma forma retangular, mas foi projetado com menos altura e mais comprimento, apresentando como medidas 18,6 (altura em relação ao piso principal na parte não coberta por varandas) por 22.9 (largura entre as paredes, não entre as faces das varandas) por 39 m (distância entre a frente do palco e a média das posições da parede traseira em todos os níveis de pavimento). Ao contrário do Gewandhaus, que apenas tem uma varanda, a sala de Boston tem dois balcões, cada um ao longo das três paredes que envolvem o corpo principal. O palco tem um corpo próprio, o que conduziu a que, em comparação com a antiga sala de Boston e a sala de Leipzig, o fundo da sala ficasse mais afastado do palco, facto que é compensado, segundo Barron (2009), pelo ângulo entre as superfícies da envolvente do palco que, funcionando como concha acústica, projetam o som para fora (Barron, 2009; Beranek, 2004; Rooth, 2017). Sabine (1922, citado por Barron, 2009, p. 89) afirmou em relação à maior distância do fundo da sala ao palco:

*in the new hall the orchestra is not out in the main body of the room, and for this reason is slightly farther from the rear of the room [compared with the Gewandhaus and the old Music Hall]; but this is more than compensated for in respect to loudness by the orchestra being in a somewhat contracted stage recess, from the side walls of which the reflection is better because they are nearer and not occupied by an audience*

De um modo geral, a proporção da sala e o seu carácter ornamental promovem as sensações de intimidade, clareza, textura, espacialidade e reverberação, e as condições em palco são propícias a uma boa mistura do conjunto orquestral. Relativamente a parâmetros objetivos, Beranek (2004) aponta para um ITDG de 15 ms e Barron (2009) para um tempo de reverberação de 1.8 segundos.

## ***b)Materialidade***

A sala de Boston promove o deleite visual por meio de fatores arquitetônicos coincidentes com aqueles que providenciam a excelente acústica, pois a talha dourada que adorna as frentes das varandas e a moldura do proscênio, as paredes superiores com nichos e réplicas de estátuas gregas e romanas, os tubos dourados do órgão, as carpetes vermelhas remetendo para os meados do século XIX, os assentos de couro preto, e tanto mais, são responsáveis, juntamente com a geometria da sala, por qualidades de entre as quais uma adequada difusão do som<sup>121</sup>, que propicia o envolvimento e a reverberação (Beranek, 2004).

O teto cofrado é composto por 1,9 cm de gesso sobre tela de metal. As paredes são constituídas por superfícies em gesso sobre ripas de metal (30%), gesso em alvenaria (50%), e superfícies revestidas por placas de madeira de 1,25 a 2,5 cm (20%, incluindo a envolvente do palco). As frentes das varandas são adornadas com padrões em ferro fundido. O chão é constituído por madeira sobre laje em betão, sendo que, para a época de concertos de inverno, é possível aplicar um pavimento inclinado que consiste em placas de 1,9cm de espessura sobre malha estrutural, cujo espaço de ar abaixo varia de 0 m (à frente) a 1,52m (atrás) (fig. 7.25). O risco de absorção das frequências baixas pelo sistema do piso inclinado com vazio por baixo é suprimido pela presença do público, conservando uma boa sensação de calor. O pavimento das varandas compõe-se de madeira em laje de betão. O palco, de 1.37 m de altura, tem um pavimento em madeira sobre caixa de ar, e as suas superfícies laterais têm como revestimento placas de madeira de 2.5 cm de espessura até uma altura de 4.3 m, e de 1,25 cm na restante área (das paredes). Os assentos são parcialmente forrados a couro, deixando os braços e a parte de baixo em madeira à vista (Beranek, 2004).

A escolha da materialidade, juntamente com a geometria, promove uma boa resposta à dinâmica orquestral e uma preservação das frequências baixas (Beranek, 2004).

---

<sup>121</sup> É certo que nem todos os fatores referidos promovem a difusão, mas o conjunto dos elementos promovem um campo sonoro com um grau de difusão aprazível



Fig. 7.25- Boston Symphony Hall, Boston, Desmontagem do pavimento utilizado na época dos concertos de inverno, para a preparação da época pop, em que são colocadas mesas no pavimento base (Boston Pops, 2011)

### ***c) Usos e comentários***

A sala é utilizada para concertos sinfónicos e concertos de Pop, para os quais o pavimento inclinado é retirado. É reconhecida em todo o mundo pela sua excelência acústica. Em Beranek (2004, p. 47) são recolhidos comentários de maestros tais como von Karajan, Bernstein, e outros, bem como de músicos: *“most noble of American concert halls”, “one of the world’s greatest halls”, “when this hall is fully occupied the sound is just right- divine”, “an excelente hall, there is none better”*.

## **7.5. Período Moderno**

### **7.5.1. Os espaços para a música do Período Moderno**

Após a primeira guerra mundial, o movimento moderno que aboliu as ornamentações das salas de concerto, a par de novas filosofias construtivas deste tipo de espaço, as quais consistiam numa ideia de direcionamento unidirecional do campo sonoro, deu origem às chamadas salas direcionais, como a Salle Playel e outras. Nesta sala o teto atuava como a principal superfície refletora, enviando a energia para o fundo que, refletido- a de novo para a frente, originava ecos no palco e na plateia. Ademais, como havia falta de elementos de difusão, as reflexões tornavam-se muito fortes, facto que, embora promovesse a inteligibilidade<sup>122</sup>, não era propício à experiência musical, a qual requer qualidades como envolvimento e reverberação, resultantes de um campo com um adequado grau de difusão. Desde 1927, data da sua construção, até ao fim do século, algumas renovações foram levadas a cabo, de entre as quais a primeira se baseou na ideologia do consultor F.R.Watson, que acreditava que a boa qualidade acústica de um auditório derivaria de um ambiente que proporcionasse sensações similares às despoletadas

<sup>122</sup> Desconsiderando o eco, pois que este acaba por a reduzir

quando se ouve música na rua, ao que foram aplicadas imensas quantidades de material absorvente. As restantes renovações apoiaram-se em teorias consideradas mais plausíveis, as quais conduziram tentativas de criar alguma difusão, eliminar ecos e melhorar as condições em palco (Barron, 2009; Beranek, 2004).

Também nesta época uma panóplia de salas em leque foi construída seguindo os passos das salas de cinema, mas este desenho mostrou adversidades acústicas, demonstrando não ser a melhor opção geométrica para salas de concertos (Barron, 2009).

Após a segunda guerra mundial as salas eram muito grandes e com uma confortável área por pessoa, ao que se tornou premente o surgimento de soluções formais inovadoras que permitissem o acolhimento de alargada audiência sem que a acústica fosse prejudicada, o que conduziu às salas em terraço, como a Filarmónica de Berlim, e também às novas arenas, cujo efeito acústico da elipse foi escondido com um perspicaz sistema de direcionamento das reflexões, como Christchurch. Ademais, a variedade de repertórios que o público procurava conduziu ao surgimento de salas de acústica variável, as quais adotaram sistemas como câmaras de reverberação, como Meyerson Center Hall em Dallas, ou tapeçarias possíveis de baixar, ou superfícies que viram (Barron, 2009; Beranek, 2004).

De entre os exemplos acima referidos, a Filarmónica de Berlim vai ser estudada com mais pormenor.

### **7.5.2. O carácter musical do Período Moderno**

A *nova música* do século XX apresenta uma rotura na história da música como nunca em nenhuma outra época os movimentos musicais de vanguarda haviam feito. Apesar de as práticas concertística e operática, bem como a música ligeira e o neoclassicismo (reação ao romantismo tardio, regresso ao clássico) terem sobrevivido a esta rotura, o abandono da tonalidade por Schonberg, e depois, do próprio conceito (tradicional) de obra musical por Cage, conduziram a uma época histórica sem precedentes, que talvez, como menciona Michels (2007), venha a ser conhecida no futuro como o fim da música tonal que de 1600 a 1900 conduziu o espírito de composição, ou ainda, como a crise da idade moderna.

A facilidade de aproximação entre os Homens e entre os Homens e a natureza, por meio das novas ciências, como a física nuclear, e do desenvolvimento dos transportes e das tecnologias, é incredivelmente contrariada pelos antagonismos crescentes entre os povos, devidos às

diferenças raciais, do estrato social, da ideologia, da cultura. Parece que o conhecimento tecnológico que tornou o mundo mais pequeno, inconscientemente também lhe despoletou uma auto percepção coletiva relativa às diferenças culturais inerentes ao crescimento do indivíduo dentro de uma comunidade, conduzindo à confusão psicológica sobre a essência do *Eu* (que sou feito do mesmo que o outro, o qual desafia a minha moralidade e comodidade, pelos seus modos de viver e pensar tão diferentes), e conseqüentemente à guerra. Como diz Manuel Alegre em “*As mãos*”, “*Com mãos se faz a paz se faz a guerra*”, e assim também a mente humana (coletiva) é caracterizada por ideologias contrastantes, resultantes de insondáveis fatores, de entre os quais, o mais rapidamente denunciável é a tradição cultural em que cada homem é criado<sup>123</sup>, as quais (ideologias), quando confrontadas com a sua própria “imagem geral”, podem ser produtivas e fazer a paz (após o crescimento individual e coletivo) e podem fazer a guerra<sup>124</sup>. Face a isto, não é surpreendente a rotura dos conceitos tradicionais na música, na qual uma época se expressa. Mas não só a mudança na forma de ver o mundo interfere com a nova música. A divulgação musical por meios tecnológicos conduz a um maior conhecimento e a uma maior exigência de perfeição acústica por parte do público, que tem mais fácil acesso aos repertórios. Deste modo:

*Pluralismo estilístico e dissonância, características da nova música, são testemunho da escassez de um conceito cósmico unitário e da perda de harmonia entre o homem e a natureza, assim como da harmonia interna do próprio ser humano. Uma consciência nova, mais ampla (ideal: integrais) do homem, do mundo e do universo no sentido de um todo harmónico e da sua expressão na música, não passam hoje em dia de uma vaga ideia*

(Michels, 2007, p. 519).

### **7.5.3. Casos de Referência**

#### **7.5.3.1. Filarmónica de Berlim**

A filarmónica de Berlim, de 1963, é o resultado do projeto de uma equipa formada pelo arquiteto Hans Scharoun e pelo consultor Lothar Cremer (figs. 7.26 e 7.27). Barron (2009, p. 106) descreve a arquitetura de Scharoun como orgânica, “...in which the form develops from the

---

<sup>123</sup> E que, por sua vez, também resulta da criação do Homem

<sup>124</sup> Como foi referido no início do trabalho, Damásio (2000) explica os estados de espírito por meio dos estados corporais, os quais, se pudessem ser fotografados, resultariam em sucessivas imagens que se associariam às sensações. A imagem é influenciada pelo exterior, pelo modo como é digerido e subjetivado por um organismo único, e, também influencia esse modo de digerir por justaposição “... à percepção ou recordação de algo que não faz parte do corpo...”. Também aqui, a “imagem coletiva” designa o resultado do modo como o organismo coletivo digere o que recebe do exterior ao qual se estende. O organismo coletivo, composto de vários individuais, permite ao individual identificar-se, mas também lhe pode causar desconforto, se não se identificar, originando a guerra

*inside outwards, in which space acts as a positive force upon the life it contains and vice versa*". Os desenhos de teatros de Scharoun abordavam uma disposição interna muito interessante, baseada nas suas observações do comportamento das pessoas quando escutam música em situações informais, como ao ouvir um músico na rua. A reunião em círculos à volta do artista haveria de ser refletida na configuração arquitetónica dos espaços, e uma interação entre a ideologia de Scharoun e os conhecimentos acústicos de Cremer conduziram ao projeto da filarmónica de Berlim que, em 1956, ganhou a competição dos projetos para a Filarmónica (Barron, 2009; Beranek, 2004).



Fig. 7.26. Filarmónica de Berlim, Berlim. Perspetiva (Coe, 2018)

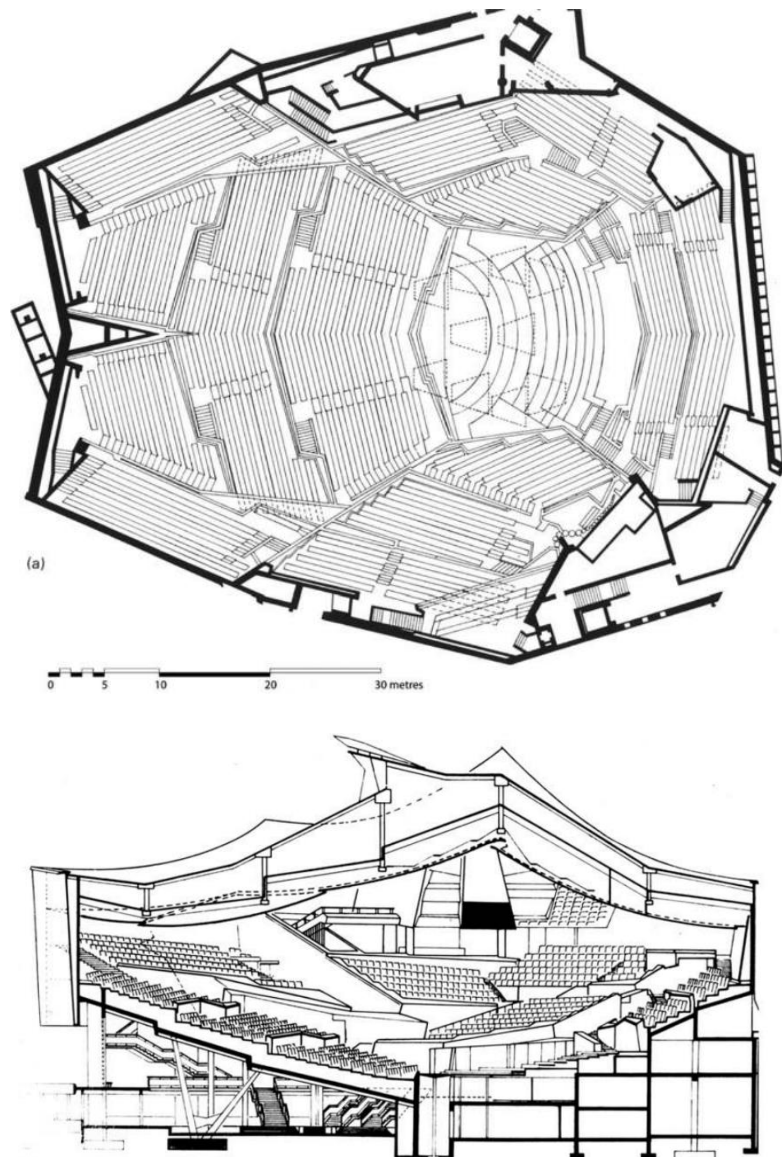


Fig. 7.27. Filarmónica de Berlim, Berlim. Planta e Corte Longitudinal (Barron, 2009)

### **a) Forma**

A Filarmónica de Berlim tem uma forma irregular, e a plateia desenvolve-se (ao redor do palco) em subformas fazendo lembrar as paisagens naturais. A maior parte dos 2218 lugares encontra-se à frente do palco (250 lugares encontram-se atrás e 300 lugares em cada lado), embora inicialmente Scharoun tenha proposto para o mesmo uma posição mais central, com o lema “*Música no centro*” (Sharoun, 1967, citado por Rooth, 2017, p. 103). Devido à diretividade dos instrumentos, e sobretudo, do efeito de sombra causado pelos corpos dos músicos, quem está atrás do palco não recebe uma sonoridade tão “limpa”, e para quem se encontra nos lados, o som é mais dominado por alguns instrumentos, os que lhe estão mais próximos. No entanto há

peessoas que gostam de ver as expressões do maestro durante o concerto, o que, uma vez que a visão e a audição se encontram no mesmo espaço cognitivo, acaba por minorar (para essas pessoas) as adversidades acústicas nessas zonas. Enquanto isso, à frente do palco o som é descrito em Beranek (2004) como sendo claro, harmonioso, vivo e envolvente, com um tempo de reverberação de 1.9 segundos com a sala ocupada (Barron, 2009; Beranek, 2004; Rooth, 2017).

A disposição em terraço, já antes experimentada na pequena Mozartsaal de 1956 (800 lugares), é muito benéfica em salas grandes, pois divide a sala em secções que podem ser trabalhadas individualmente, e permite o acolhimento de um maior número de espectadores a distâncias aceitáveis do palco, neste caso, não superiores a 30 m. Isto sem referir o efeito visual fantástico típico destes recintos. As superfícies que delimitam as varandas são inclinadas de modo a direcionar as reflexões para as secções adjacentes e (as que rodeiam o palco) para o palco. Para além destas, 10 painéis largos (7.5 m<sup>2</sup>) suspensos acima do palco, cuja altura pode variar de 10 a 12m, e com 50 % de área aberta, conduzem as primeiras reflexões para o palco e para a plateia. As filas de trás são apoiadas por reflexões do teto em forma de tenda, no qual a “paisagem natural” dos terraços se encontra, e de uma proa que as promove (às reflexões) lateralmente. Na altura em que a Filarmónica de Berlim foi construída ainda não estava popularizada entre os peritos a ideia dos benefícios das reflexões laterais, e então, a sala não foi construída sobre essa base ideológica, sendo que, ainda assim, apresenta uma configuração adequada a uma boa acústica. Ainda, este tipo de configuração em patamares permite que o som direto das frequências baixas não seja tão perdido por incidência na plateia (“grazing incidence”, que prejudica o calor acústico). A sensação de calor também é controlada através 136 elementos piramidais ressonantes (que absorvem as baixas frequências), os quais também funcionam como difusores (Barron, 2009; Beranek, 2004).

### ***b)Materialidade***

Parte das paredes laterais compõe-se de madeira fina sobre caixa de ar, e os limites das varandas são revestidos com gesso de calcário. Estas superfícies são lisas, pelo que a difusão sonora apenas é assegurada pelo teto em tenda, pelas pirâmides ressonantes, e pelos painéis suspensos convexos. O teto é constituído por gesso suspenso em metal expandido, e os painéis sobre o palco são de poliéster. A laje pré fabricada da audiência é revestida por parquet em asfalto e o

chão do palco é madeira sobre caixa de ar. Os assentos rebatíveis de madeira são parcialmente forrados (Beranek, 2004).

***c) Usos e comentários***

A filarmónica de Berlim é a sede da orquestra filarmónica de Berlim e maioritariamente as atividades que na sala decorrem são concertos (Beranek, 2004).

## 8.CONCLUSÕES

Quando se aborda a conceção arquitetónica de uma sala de concertos em função da acústica, tem-se acesso a uma complexa paisagem de soluções que visam alcançar ambientes acústicos que optimizem a experiência musical, ao mesmo tempo que se propõem a satisfazer inúmeros fatores externos distintos de caso para caso, como a dimensão do público, o espaço cedido por pessoa, questões territoriais e económicas. Desde a forma retangular das salas clássicas às geometrias audaciosas das salas em terraço, desde sistemas de acústica variável, como câmaras reverberantes, paredes reversíveis, canópios reguláveis em altura, etc... a acústica arquitetónica tem vindo a desenvolver uma versatilidade a estas questões, e sensibilidade aos repertórios musicais.

Ao longo do trabalho foi abordado como a popularização das atividades concertísticas públicas, bem como o crescimento da área requisitada por pessoa para a realização das mesmas, conduziu a uma evolução de soluções geométricas e materiais. A par desta evolução, tornou-se premente uma outra, a das ferramentas que permitissem avaliar soluções arquitetonicamente mais complexas. Daqui se criaram estruturas parametrizáveis que permitissem estabelecer relações objetivas entre a arquitetura e a experiência musical que é, no fundo, o propósito das salas de concerto. Em paralelo, o progresso dos modelos digitais, analógicos e matemáticos auxilia a aferição da viabilidade acústica em função da interrelação dos parâmetros.

Não obstante, torna-se ainda necessário o estudo dos testemunhos construídos ao longo de séculos, mesmo daqueles construídos ainda sem os auxílios referidos que constituem ferramentas da acústica arquitetónica, pois que, apesar da imensa evolução desta disciplina, o carácter multidimensional da experiência musical extravasa as avaliações por meio dos modelos, ainda que o valor da sua utilidade seja inestimável, ao que se devem valorizar as duas potências em sobreposição, a intuição materializada (nas salas) dos antigos, e a capacidade prática e intelectual de manejo e avaliação de hipóteses arquitetónicas que caracteriza os dias de hoje.

Através de uma janela que se abre para as diversas épocas da história da música é possível perceber que a composição arquitetónica dos espaços para a música influencia as composições musicais, pois que, se o compositor compõe por meio da fusão do ambiente externo em que vive, com o ambiente imaginário interno, então a acústica do ambiente externo tem um elevado peso. Do mesmo modo, também a composição musical origina a configuração de novos espaços,

pois que o ambiente imaginário interno, no seu espírito criativo, concebe obras que antevêm espaços novos. O próprio Richard Wagner desenhou uma sala que se adequasse às suas óperas. Beethoven, que marcou a transição entre os períodos clássico e romântico compôs peças que anteviam as novas salas, mais reverberantes, do século XIX. A partir desta janela pode ver-se o resultado de séculos de evolução de uma tipologia arquitetónica que culmina, nos dias de hoje, com salas de acústica adaptável aos repertórios das várias épocas desde o Barroco até à atualidade, a qual é caracterizada por uma rica diversidade nos estilos de composição musical, e por uma procura variegada de repertórios por parte do público.

## ANEXO A

Tab. A1 - Peso dos oito atributos acústicos listados por Beranek em 1962 (Tabela traduzida de Long, 2006, p. 667):

Atributo	Sala de Concertos	Sala de Ópera
Intimidade	40	40
Vivacidade	15	15
Calor	15	15
Força Sonora do som direto	10	10
Força Sonora do som reverberante	6	6
Balanço	6	10
Difusão	4	0
Harmonia do Conjunto	4	4
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Tab. A2 - Peso dos atributos acústicos listados por Beranek em 1996 após os parâmetros emergentes dos experimentos de Ando (Tabela traduzida de Long, 2006, p. 668):

Atributo	Sala de Concertos
$IACC_{E3}$	25
EDT	25
SDI	15
$G_{mid}$	15
ITDG	10
BR	10
<b>Total</b>	<b>100</b>



## ANEXO B

Eq. B1- expressão matemática caracterizadora do modelo linear estimador da qualidade acústica total do espaço (traduzido de Long, 2006, p. 669):

$$S = \sum_{i=1}^N S_i$$

Em que  $S_i = -a_i |x_i|^{3/2}$

E em que  $X_i$  são os valores medidos dos parâmetros e  $a_i$  são os pesos

$X_1 = IACC_{E3}$	$a_1 = 1.2$	$a_1 = 1.2$
$X_2 = 10 \log (ITDG/(ITDG)_{preferido})$		$a_2 = 1.42$
$X_3 = G_{mid} - (G_{mid})_{preferido}$		$a_3 = 0.04$ para $G_{mid} < 4.0$ $a_3 = 0.07$ para $G_{mid} > 5.5$
$X_4 = \log (EDT/ (EDT)_{preferido})$		$a_4 = 9$ para $EDT < 2.0$ s $a_4 = 12$ para $EDT > 2.3$ s
$X_5 = \log (BR/(BR)_{preferido})$		$a_5 = 10$ para $2.2$ s
$X_6 = \log (SDI/(SDI)_{preferido})$		$a_6 = 1$

Os valores preferidos dos diversos atributos são:

$$(ITDG)_{preferido} = 20 \text{ ms ou menos}$$

$$(G_{mid})_{preferido} = 4 \text{ a } 5.5 \text{ dB}$$

$$(EDT)_{preferido} = 2 \text{ a } 2.3 \text{ s}$$

$$(BR)_{preferido} = 1.1 \text{ para } 1.25 \text{ para } RT = 2.2 \text{ s}$$
$$1.1 \text{ para } 1.45 \text{ para } RT = 1.8 \text{ s}$$

$$(SDI)_{preferido} = 1$$



## ANEXO C

Equações dos parâmetros acústicos

Eq. C1 - Razão de Baixos (“Bass Ratio”) (Beranek, 2004)

$$BR = \frac{RT_{125} + RT_{250}}{RT_{500} + RT_{1,000}}$$

Eq. C2 – Fator da Força Sonora (Beranek, 2004)

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{t_2} p^2(t) dt}{\int_0^{t_2} p_A^2(t) dt} \text{ dB}$$

Eq. C3 – Fator de Clareza (Figueiredo, 2005)

$$C_{80} = 10 \log \left[ \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{t_f} p^2(t) dt} \right]$$

Eq. C4 – índice de Qualidade Binaural (“Binaural Quality Index”) (Beranek, 2004)

$$BQI = (1 - IACC_{E3})$$

Eq. C5 – Fração Lateral (“Lateral Fraction”) (Figueiredo, 2005)

$$LF = \frac{\int_0^{80ms} p_{lat}^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p_{omni}^2(t) dt}$$

Eq. C6 – Suporte do Palco para a harmonia do conjunto (“Stage Support”) (Beranek, 2004)

$$ST1 = 10 \log \left[ \frac{\int_{.02}^{0.1} p^2(t) dt}{\int_0^{.01} p^2(t) dt} \right]$$

## Bibliografia

### Referências Bibliográficas

Adami, Felipe K. (2012). *Os instrumentos da orquestra*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em:

<https://www.ufrgs.br/napead/repositorio/objetos/orquestra-virtual/instrumentos.php>

(consultado em 09 de Dezembro de 2020)

Almeida, Jefferson (2020). *Royal Albert Hall*. Disponível em:

<https://jeffersondealmeida.com.br/5-lugares-imperdiveis-em-londres-na-regiao-de-marylebone/royal-albert-hall-1550061815-5-2560x1440/> (consultado em 07 de Dezembro de 2020)

Alves 2, Marcelo (2017a, 23 de Setembro). *Howard Goodall`s Story of Music pt1 (legendado)*. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=5yXArIvwoeQ&t=1727s> (consultado em 02 de Junho de 2020)

Alves 2, Marcelo (2017b, 28 de Setembro). *Howard Goodall`s Story of Music pt2 (legendado)*. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=jZHu9ftCHOs&t=162s> (consultado em 02 de Junho de 2020)

Amorosi. A.D. (2018). *A peek behind the velvet curtain of the Academy Ball*. Disponível em: <https://www.phillyvoice.com/peek-behind-velvet-curtain-academy-ball/> (consultado em 20 de Outubro de 2020)

Antunes, Guilherme (2016). *Teatro Olímpico de Vicenza*. Disponível em:

<https://www.jornaltornado.pt/teatro-olimpico-vicenza/> (consultado em 29 de Dezembro de 2020)

Apaixonados por História (s.d.). *Arquitetura de Teatros e Anfiteatros no mundo Romano*. Disponível em: <https://www.apaixonadosporhistoria.com.br/artigo/203/arquitetura-de-teatros-e-anfiteatros-no-mundo-romano> (consultado em 08 de Novembro de 2020)

Arad, Ideh Negaran (2011). *The Royal Albert Hall Acoustics before and after redevelopment*. Disponível em: <http://www.conferencehall.co/en/the-acoustics-of-the-auditorium-of-the-royal-albert-hall-before-and-after-redevelopment/> (consultado em 17 de Dezembro de 2020)

Arbonés, J.; Milrud, P. (2018). *A harmonia é numérica – música e matemática*. National Geographic Magazine Portugal

Assistance Scolaire (2000-2020). *Le son, phénomène vibratoire*. Disponível em: [https://www.assistancescolaire.com/eleve/1re/enseignement-scientifique/reviser-le-cours/1\\_sci\\_27/print?print=1&printSheet=1](https://www.assistancescolaire.com/eleve/1re/enseignement-scientifique/reviser-le-cours/1_sci_27/print?print=1&printSheet=1) (consultado em 22 de Dezembro 2020)

Avery Fisher Hall (s.d.). *Avery Fisher Hall*. Disponível em: <http://averyfisherhall.org/> (consultado em 09 de Novembro de 2020)

Barron, M. (2009). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. Taylor & Francis

Beale, M. (2002). *Sensuality and proportion. A primer in sound for architects*. Disponível em: <https://www.philophony.com/sensprop/pythagor.html> (consultado em 30 de Maio de 2020)

Beranek, L. (2004). *Concert Halls and Opera Houses, Music, Acoustics, and Architecture*. 2ª edição, New York: Springer- Verlag New York.

Berkshire Choral International (2020). *Boston*. Disponível em:

<https://www.berkshirechoral.org/programs/boston> (consultado em 23 de Dezembro de 2020)

Borges, Cássio (2019). *Tessitura Musical*. Disponível em:

<https://tecnicodesom.no.comunidades.net/tessitura-musical> (consultado em 22 de Dezembro de 2020)

Boston Pops (2011). *Symphony Hall conversation: BSO to Boston Pops*. Disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=qt4joqbRJck&fbclid=IwAR0MkgewSUBPzi4XUXhel-zdp3zy-JDncDi8ntOoZVLJeKju5dkvRWC-q7A> (consultado em 23 de Dezembro de 2020)

Brandão, E. (2018). *Acústica de Salas: Projeto e Modelagem*. São Paulo: Edgard Blucher Ltda

Carrión Isbert, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Univ. Politèc. de Catalunya

Centro Virtual Camões (2020). Teatro Nacional de São Carlos. Disponível em:

[http://cvc.instituto-camoes.pt/teatro-em-portugal-espacos/teatro-nacional-de-sao-carlos-63547.html#.X\\_s1K-j7RPY](http://cvc.instituto-camoes.pt/teatro-em-portugal-espacos/teatro-nacional-de-sao-carlos-63547.html#.X_s1K-j7RPY) (consultado em 23 de Dezembro de 2020)

CBSO Centre (2013). *CSBSO Tour of Asia and Germany Tokio*. Disponível em:

<https://cbsocentre.co.uk/news/csbsocentre-tour-of-asia-and-germany-tokyo> (consultado em 07 de Dezembro de 2020)

Chagué, M. (2001). *L'acoustique de l'habitat. Principes fondamentaux. Applications de la réglementation française et européenne*. Éditions Le Moniteur. Paris

Classictic (2020). *Concertgebouworkest: Brahms, Sibelius*. Disponível em: [https://www.classictic.com/en/concertgebouworkest\\_brahms\\_sibelius/78630/](https://www.classictic.com/en/concertgebouworkest_brahms_sibelius/78630/) (consultado em 07 de Julho de 2020)

Coe, Flávia (2018). *Uma visita à Filarmónica de Berlim*. Disponível em: <https://berlinetc.com/arte-e-cultura/uma-visita-a-filarmonica-de-berlim/> (consultado em 27 de Dezembro de 2020)

Cox, Trevor (2014). *The Sound Blog*. Disponível em: <http://trevorcox.me/tag/flutter-echo> (consultado em 01 de Junho de 2020)

Damásio, A. (2000). *O Erro de Descartes. Emoção, Razão e Cérebro Humano*. Publicações Europa-América

Davis, M.; Masten, S. (2016). *Princípios de Engenharia Ambiental*. 3ª edição, Porto Alegre: AMGH Editora.

Dottori, Horacio (2014). *Desvio para o vermelho e Lei de Hubble*. Disponível em: [https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=desvio-para-o-vermelho-e-lei-de-hubble&fbclid=IwAR3c-FLIn50WvmQ3Hy3COfs-rjZrDDju4Rblzm2Yam\\_KhPViKy-MwWD2Ofo](https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=desvio-para-o-vermelho-e-lei-de-hubble&fbclid=IwAR3c-FLIn50WvmQ3Hy3COfs-rjZrDDju4Rblzm2Yam_KhPViKy-MwWD2Ofo) (Consultado em 01 de Junho de 2020)

Eurnited Arts (2020). *Berlin Philharmonic Hall*. Disponível em: <https://eurnited.org/berlin-philharmonic-hall-2/> (consultado em 11 de Novembro de 2020)

FDA (s.d.). *Bass Performance Hall*. Disponível em:

[http://www.fda-online.com/project\\_detail/19/bass-performance-hall--nancy-lee--amp--perry-r-bass-performance-hall/#](http://www.fda-online.com/project_detail/19/bass-performance-hall--nancy-lee--amp--perry-r-bass-performance-hall/#) (consultado em 10 de Novembro de 2020)

Feixa, J. (s.d.). Disponível em:

<https://i.pinimg.com/originals/26/df/60/26df60441fbf1613ab958dc99a0a13a3.jpg> (consultado em 15 de Outubro de 2020)

Figueiredo, Fábio Leão. (2005). *Parâmetros Acústicos Subjetivos: Critérios para a Avaliação da Qualidade Acústica de Salas de Música*. Tese de Mestrado em Musicologia. Universidade de São Paulo - Escola de Comunicações e Artes. São Paulo

Gewandhaus Orchester (2020). *Geschichte*. Disponível em:

<https://www.gewandhausorchester.de/haus/historie/> (consultado em 05 de Dezembro de 2020)

Gosselaar, T. (s.d.). *De Doelen*. Disponível em:

<https://www.theateradvies.nl/en/projects/projectdetails/?id=8> (consultado em 10 de Outubro de 2020)

Hatch, Donna (2016). *The Kings Theatre London*. Disponível em: <https://donna-hatch.com/the-kings-theatre-london/> (consultado em 04 de Novembro de 2020)

Jen There Done That (2015). *ASU Gammage Theatre*. Disponível em:

<https://jenthredonethat.com/asu-gammage-theatre/> (consultado em 18 de Outubro de 2020)

KKL Luzerne Management AG (2020). Choose the Concert Hall for your convention or client event. Disponível em: <https://www.kkl-luzern.ch/en/your-event/your-congress/concert-hall> (consultado em 10 de novembro 2020)

Kolarik, Andreas (s.d.). *Grobes Festpielhaus*. Disponível em:

<https://www.salzburg.info/de/veranstaltungen/veranstaltungsorte/grosses-festpielhaus>  
(consultado em 04 de Novembro de 2020)

Korom, János (2020). *Grandiose Ballroom*. Disponível em:

<https://cityseeker.com/nuremberg/688104-redoutensaal> (consultado em 04 de Novembro de 2020)

Lacatis, Radu; Giménez, Alicia; Sevilhano. A. B.; Cerdá, Salvador; Romero, José; Cibrián, Rosa (2008). *Historical and Chronological evolution of the concert hall acoustic parameters*. Proceedings of Acoustics`08, Paris. p. 4377- 4382

Lagoa, V.G.G. (2016). *Análise de painéis difusores acústicos em 2D e 3D*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Coimbra-Faculdade de Ciências e Tecnologia

Long, Marshall. (2006). *Architectural Acoustics*. Oxford: Elsevier Inc.

Martson, P (2013). *Review: An Evening of Music and Dance, Birmingham Royal Ballet, Symphony Hall*  
Disponível em: <https://www.birminghammail.co.uk/whats-on/theatre-news/review-an-evening-of-music-and-dance-birmingham-1249242> (consultado em 10 novembro 2020)

Mateus, D. (2008). *Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Matos, J.T. (2018). *Caracterização do perfil de ruído em vias de grande tráfego em Lisboa*. Trabalho Final de Mestrado (Projeto) para obtenção do grau de Mestre em Engenharia da Qualidade e Ambiente. ISEL, Lisboa

Michels, U. (2003). *Atlas da Música I*. Lisboa: Gradiva.

Michels, U. (2007). *Atlas da Música II*. Lisboa: Gradiva.

Morris, Heather (2020). *Events and Appearances*. Disponível em:

<http://www.heathermorrisauthor.com/event/royal-festival-hall-london/> (consultado em 05 de Dezembro de 2020)

Musikverein (2020). *Der Grosse Musikvereinssaal*. Disponível em:

<https://www.musikverein.at/der-grosse-musikvereinssaal> (consultado em 04 de Dezembro de 2020)

Nogueira (2015). Trienal de Arquitetura de Lisboa. Disponível em:

<https://www.trienaldelisboa.com/galeria/d/ohl-2015> (consultado em 10 de Agosto de 2020)

Osaka Convention & Tourism Bureau (s.d.). *The Symphony Hall*. Disponível em: <https://mice.osaka-info.jp/en/page/the-symphony-hall-mice> (consultado em 18 de Outubro de 2020)

Passeri Acústica e Arquitetura (2018, 11 de Outubro). *Você sabe o que determina a qualidade sonora em uma sala de concertos?* Disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=xXCqswlWFiwQS+study%2C+2020> (consultado em 05 de Maio de 2020)

Prata-Shimomura, A.; Duarte, D.; Monteiro, L.M.; Michalsk, R.L.X.N. (2004). dB, *Pressão, Potência e Intensidade*. Disponível em:

<http://www.fau.usp.br/arquivos/disciplinas/au/aut0278/Aulas/AUT0278%20Aula%2004%20-%20dB%20Press%C3%A3o%20Pot%C3%Aancia%20Intensidade.pdf> (consultado em 01 de Junho de 2020)

QS Study (2020). *Loudness of Sound*. Disponível em: <https://qsstudy.com/physics/loudness-of-sound> (consultado em 22 dezembro 2020)

Rathnayake, R.A.; Wanniarachchi. W. K. I. L.; (2019). *Image Source Method Based Acoustic Simulation For 3-D Room Environment*. International Journal of Scientific & Technology Research, (8), 11, 222-228

Regency Reader (s.d.). *Regency Hot Spots: Hanover Square Rooms*. Disponível em: <http://www.regrom.com/2016/02/12/regency-hot-spots-hanover-square-rooms/> (consultado em 04 de Novembro de 2020)

Ribeiro, Jorge M. Tavares (2002). *Acústica*. Universidade Técnica de Lisboa, Faculdade de Arquitetura

Rooth, L.M. (2017). *Entender a Arquitetura, Seus elementos, história e significado*. Editorial Gustavo Gili, S.A.

Santoro, André (2002). *Que animais enxergam por meio de sons e como eles fazem isso?*. Super Interessante Disponível em: <https://super.abril.com.br/ciencia/que-animais-enxergam-por-meio-de-sons-e-como-eles-conseguem-fazer-isso/> (consultado em 01 de Junho de 2020)

Schawaabe, Natalie (s.d.). *Vienna Musikverein Golden Hall*. Disponível em: <https://www.br-so.com/sound-and-space/akustik-konzertsaele-360/akustik-im-musikverein-wien-goldener-saal/> (consultado em 09 de Dezembro de 2020)

Schiavoni, Leyla (2016). *Relación entre  $\Delta f$  y altura tonal*. Disponível em: [http://musiki.org.ar/Relaci%C3%B3n entre %CE%94f y altura tonal](http://musiki.org.ar/Relaci%C3%B3n%20entre%20%CE%94f%20y%20altura%20tonal) (consultado em 22 dezembro 2020)

Serrano, Pablo (2018). *Material Acústico Projetável- Ressonador de Helmholtz*. Disponível em: <http://portalacustica.info/material-acustico-projetavel/> (consultado em 03 de Novembro de 2020)

Simonetti, Mauricio (2017). *Livro “Vestígios da Memória” mostra a riqueza da arquitetura paulista*. Disponível em: <https://saopaulosao.com.br/conteudos/outros/3351-livro-vestigios-da-memoria-mostra-a-riqueza-da-arquitetura-paulista.html#> (consultado em 04 de Novembro de 2020)

Sresnewsky, Igor (s.d.). *Estudo Acústico dos Teatros Gregos*. Disponível em: [http://www.lazuliarquitetura.com.br/artigo\\_igor.htm?fbclid=IwAR3EmHClynIPXVo7TX\\_TzvlSYNcuPFzkdUa9JKzpaaBNC2OLOpNgkIOFFf8#Topo](http://www.lazuliarquitetura.com.br/artigo_igor.htm?fbclid=IwAR3EmHClynIPXVo7TX_TzvlSYNcuPFzkdUa9JKzpaaBNC2OLOpNgkIOFFf8#Topo) (consultado em 01 de Agosto de 2020)

Takahashi, V.F.M. (2010). *Influência das características arquitetônicas na qualidade acústica de salas de concerto*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. São Paulo

Tokio Opera City Cultural Foundation (s.d.). *Concert Hall*. Disponível em:

<https://www.operacity.jp/en/concert/facilities/ch/> (consultado em 17 de Outubro de 2020)

Torres, V.F.N.; Gama, C.D.; Villas-Boas, R.C. (eds.) (2005). *Engenharia Ambiental Subterrânea e Aplicações*. Rio de Janeiro: CETEM/CYTED

Trpceski, Simon (2019). Disponível em: <https://www.trpceski.com/event/stuttgart-germany/> (consultado em 05 de Novembro de 2020)

Tsichlis, Georgios (2020). *Getting to the Ancient Theatre of Epidaurus from Athens*. Disponível em: <https://whyathens.com/getting-epidaurus-theatre/> (consultado em 04 de Dezembro de 2020)

UFRGS TV (2014, 30 de Outubro). *Simplifísica - Modos de vibração e fenômenos ondulatórios*. Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=b\\_icPvC92P4&t=1477s](https://www.youtube.com/watch?v=b_icPvC92P4&t=1477s) (consultado em 01 de Junho de 2020)

UNESCO- EOLSS (2009). *Fundamentals of Physics Volume I, Encyclopedia of Life Suported Systems*. Jose Luis Moran-Lopez

Vitrúvio (2015). *Vitrúvio, Tratado de Architectura*. Lisboa: IST Press

Wenders, Wim (2018). Papa Francisco: *Um Homem de Palavra*. Netflix

Wikiarquitectura (s.d.). *Filarmônico o Elba*. Disponível em:

<https://pt.wikiarquitectura.com/constru%C3%A7%C3%A3o/filarmonico-o-elba/#filarmonicaelba-32> (consultado em 17 de Outubro de 2020)

World CC Bonn (2002- 2020). *Beethovenhale*. Disponível em: <https://www.bonn-region.de/our-network/world-conference-center-bonn-en.html> (Consultado em 11 de Novembro de 2020)

### **Obras não consultadas diretamente**

Bagenal, H.; Wood, A. (1931). *Planning for Good Acoustics*. London: Methuen & Co Ltd.

Beranek, L.L. (1962). *Music, Acoustics and Architecture*. 1st edition, J. Wiley & sons

Dumont, G.P.M. (1774). *Parallèle de plans de plus belles salles de spectacles d'Italie et de France, avec des détails de machines théâtrales*. B. Blom

Forsyth, M. (1985). *Buildings for Music: The Architect, the Musician, the Listener from the Seventeenth Century to the Present Day*. Cambridge: MIT Press

Knudsen, V.O. (1932). *Architectural Acoustics*. J. Wiley & sons

Rayleigh, J.W.S. (1877). *Theory of Sound*, vol. 1. London: Macmillan and Company

### **Bibliografia não aplicada diretamente**

Donoso, J.P.; Tannus, A.; Guimarães, F.; Freitas, T.C. (2008). *A Física do Violino*. Revista Brasileira de Ensino de Física.

Errede, S. (2002-2017). *Consonance & Dissonance*. Disponível em:

[https://courses.physics.illinois.edu/phys406/sp2017/Lecture\\_Notes/P406POM\\_Lecture\\_Notes/P406POM\\_Lect8.pdf](https://courses.physics.illinois.edu/phys406/sp2017/Lecture_Notes/P406POM_Lecture_Notes/P406POM_Lect8.pdf) (consultado em 30 de Maio de 2020)

MDN web docs mozilla//a (2019). *Standard OS Libraries*. Disponível em:

[https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Mozilla/js-ctypes/Using\\_js-ctypes/Standard\\_OS\\_Libraries](https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Mozilla/js-ctypes/Using_js-ctypes/Standard_OS_Libraries) (consultado em 07 de Novembro de 2020)

Micklavzina, S. (2011). *Physics of Sound and Music, Lecture 3&4: Waves*. Disponível em:

<https://pages.uoregon.edu/stanm/PHYS152SUMMER2011/LECTURES3and4-WAVES.html>

(consultado em 30 de Maio de 2020)

Whipple Museum of the History of Science (2020). *Monochord*. Disponível em:

<https://www.whipplemuseum.cam.ac.uk/explore-whipple-collections/acoustics/monochord>

(consultado em 30 de Maio de 2020)

