



João Miguel de Albuquerque Morais d'Almeida

REABILITAÇÃO ACÚSTICA EM EDIFÍCIOS DE VALOR HISTÓRICO ESTRATÉGIAS PARA MELHORIA DO CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DE ESPAÇOS

ACOUSTIC REHABILITATION OF HISTORIC BUILDINGS
STRATEGIES FOR THE IMPROVEMENT OF ROOM ACOUSTICS

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, na área de Especialização em Acústica,
orientada pelo Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus e pela Professora Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira

Coimbra, 5 de Março de 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

João Miguel de Albuquerque Morais d'Almeida

REABILITAÇÃO ACÚSTICA EM EDIFÍCIOS DE VALOR HISTÓRICO ESTRATÉGIAS PARA MELHORIA DO CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DE ESPAÇOS

**Acoustic rehabilitation of historic buildings
Strategies for the improvement of room acoustics**

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, na área de Especialização em Acústica,
orientada pelo Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus e pela Professora Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões
que possa conter.

Coimbra, 5 de Março de 2018

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Diogo Mateus e à Professora Doutora Andreia Pereira, pela orientação, inspiração e partilha de conhecimento e experiência.

A todos os Professores que leccionaram este mestrado, MEAECS 16/18, pela partilha de conhecimento dedicada e generosa, e aos colegas pela camaradagem e empenho.

À minha mahal Armie, à família e aos amigos, agradeço o apoio permanente.

Ao Carlos e à Juliet um agradecimento especial pela amizade generosa com que sempre nos receberam.

*The final question will be:
is the soundscape of the world an indeterminate composition over which we have no control,
or are we its composers and performers, responsible for giving it form and beauty?*

R. Murray Schafer

RESUMO

A reabilitação e requalificação do património edificado tem vindo a assumir um peso crescente na construção em Portugal. Em edifícios antigos, em particular quando se pretende uma alteração profunda das suas funções e a adaptação a recintos com elevadas exigências de conforto acústico, como são exemplo os auditórios e grandes salas polivalentes, é fundamental um estudo de condicionamento acústico aprofundado e uma forte interacção com as restantes especialidades envolvidas, garantindo a manutenção do valor patrimonial do edifício.

Quando os edifícios se revestem de adicional importância, como é o caso de edifícios com elevado valor histórico, há especificidades que requerem investigação adicional nos âmbitos da história e da arquitectura.

No presente trabalho, procuraram-se estratégias de condicionamento acústico adequadas à reabilitação de salas e edifícios de elevado valor histórico.

Usou-se para tal um caso de estudo: o edifício da igreja do Colégio da SS. Trindade. Um edifício do séc. XVII ao estilo arquitectónico maneirista que agora cumpre a função de Grande Auditório da Casa da Jurisprudência, integrada na Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra. Este espaço sofreu recentemente uma reabilitação durante a qual foram introduzidos alguns revestimentos com elevada absorção sonora, com o intuito de reduzir o tempo de reverberação.

Foram feitas medições acústicas no auditório vazio. Recolheram-se os resultados de parâmetros relativos ao tempo de reverberação e à definição e inteligibilidade da palavra. Analisou-se o campo sonoro do auditório e a sua geometria complexa, e identificaram-se os desafios acústicos existentes.

Conhecendo o programa e os objectivos do utilizador final daquele espaço, um auditório maioritariamente dedicado à palavra, traçaram-se os objectivos acústicos e determinaram-se as métricas ideais a alcançar.

Para poder testar as estratégias desenvolvidas construiu-se um modelo numérico do auditório nas condições actuais, num programa de acústica de traçado de raios. A construção deste modelo necessitou da recolha de informação de projecto, no local e bibliográfica. De seguida, o modelo foi calibrado ajustando os coeficientes de absorção sonora dos materiais de revestimento das superfícies, minimizando o erro entre o tempo de reverberação simulado e medido, em cada banda de oitava de frequência. Foram ainda simulados os restantes parâmetros acústicos para comparação com os valores medidos, tendo-se verificado genericamente uma boa correlação.

Avançou-se então para a investigação da história da igreja, no sentido de perceber as limitações na procura de soluções, por forma a respeitar o valor histórico e compatibilizar as estratégias com a arquitectura original e a arquitectura da reabilitação. Estas limitações podem ocorrer ao nível de elementos móveis ou fixos, de tipos de materiais e aparência, de contemporaneidade e anacronismo.

Procedeu-se ao desenvolvimento de estratégias e definição e materialização de propostas de soluções para melhorar o desempenho acústico do auditório. Estas propostas foram testadas no modelo numérico e os resultados apresentados e analisados.

Finalmente, foram tiradas conclusões e apresentados desenvolvimentos futuros.

Palavras-chave: condicionamento acústico, reabilitação, edifícios históricos, igreja, auditório, traçado de raios, simulação, modelo

ABSTRACT

The rehabilitation and requalification of the built heritage assumes an increasing weight in the construction industry in Portugal. In historic buildings, in particular when there is a deep change of its function and transformation to halls where high quality acoustics is required, such as auditoriums and large multipurpose halls, a thorough acoustics study and a strong interaction with other design stakeholders is mandatory, in order to safeguard the historical value.

When buildings are of major importance, such as those with high historical value, there are specifics that require additional research in the fields of history and architecture.

In this dissertation, room acoustics strategies were developed, in accordance with the rehabilitation of such kind of rooms or buildings, of high historical value.

A case study was used: the church building of the Colégio da SS. Trindade. A 17th century church, of Mannerist architectural style that has been transformed to a grand auditorium of the Casa da Jurisprudência, integrated in the Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra. This space has recently undergone a rehabilitation during which some lining materials with high sound absorption were installed, with the purpose of reducing the reverberation time.

Acoustic field measurements were carried out in the auditorium, empty. The results of the reverberation time were taken, as well as the results of the definition and intelligibility of speech. The auditorium's sound field was assessed along with its complex geometry, and existing acoustic challenges were identified.

Knowing that this auditorium is mainly dedicated to speech events, the acoustic objectives were defined and the metrics to be achieved were determined.

In order to test the strategies developed, a computational model of the auditorium was created in its current conditions, using a ray tracing software. The creation of this model required the collection of design information, on-site surveys and bibliographical survey. Following that, the model was calibrated by adjusting the sound absorption coefficients of the surfaces materials, to minimize the error between the simulated and measured reverberation times in

each frequency octave band. Other acoustic parameters were also simulated for comparison with the measured values, and a good overall correlation was obtained.

The next step was to survey the history of the church in order to perceive the constraints of the solutions, so that the historical value is preserved and the strategies embed with the original architectural design and the rehabilitation architectural design. These limitations can be of mobile or fixed features, types of materials and its appearance, contemporaneity and anachronism.

Strategies were developed and solutions were proposed to improve the acoustic performance of the auditorium. These proposals were then tested in the computational model and the results presented and analysed.

Finally, conclusions to this study were drawn and future developments were presented.

Keywords: room acoustics, rehabilitation, historical buildings, church, auditorium, ray tracing, simulation, model

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objectivos.....	1
1.3 Organização do trabalho.....	2
2 ESTADO DA ARTE.....	3
2.1 Propagação do som em espaços fechados.....	3
2.1.1 Som reflectido.....	3
2.1.2 Relação entre campo directo e campo reverberante. Nível total de pressão sonora....	4
2.2 Tempo de reverberação e relação com a absorção.....	7
2.2.1 Conceito.....	7
2.2.2 Medição.....	8
2.2.3 Cálculo.....	9
2.3 Absorção sonora.....	10
2.3.1 Conceito.....	10
2.3.2 Mecanismos de absorção.....	11
2.3.3 Coeficientes de absorção sonora.....	12
2.4 Palavra (discurso oral).....	14
2.4.1 Características.....	14
2.4.2 Relação entre o Tempo de Reverberação e a inteligibilidade da palavra.....	15
2.5 Medidas objectivas para palavra.....	16
2.5.1 Definição da Palavra – D_{50}	16
2.5.2 Speech Transmission Index – STI.....	17
2.5.3 Rapid Speech Transmission Index – RASTI.....	17
2.5.4 Early Decay Time – EDT.....	17
2.5.5 Rácio de Lochner e Burger.....	18
2.6 Arcos côncavos.....	19
3 CASO DE ESTUDO.....	21
3.1 Apresentação e Enquadramento histórico.....	21
3.2 Caracterização geométrica e material.....	23
3.2.1 Nave.....	26

3.2.2 Capela-Mor	28
3.2.3 Coro Alto	29
3.2.4 Capelas Laterais Sul.....	30
3.2.5 Capelas Laterais Norte.....	31
3.3 Levantamento de materiais de revestimento	31
3.4 Desafios	32
3.4.1 Alteração de funções.....	32
3.4.2 Pé-direito elevado	33
3.4.3 Tectos em abóbada.....	33
3.4.4 Rácio de volume por número de lugares	33
3.4.5 Materiais com baixo coeficiente de absorção sonora	34
3.4.6 Distância à fonte	34
3.4.7 Mobiliário e decoração	34
3.5 Objectivos acústicos	34
3.5.1 Tempo de reverberação (TR).....	34
3.5.2 Early Decay Time (EDT).....	36
3.5.3 Definição da palavra (D_{50}).....	37
3.5.4 Inteligibilidade da palavra (STI / RASTI)	37
4 CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DO CASO DE ESTUDO	38
4.1 Medições objectivas da acústica do caso de estudo	38
4.1.1 Equipamento	38
4.1.2 Características do ar (meio de propagação).....	38
4.1.3 Posições de Fontes e de Receptores.....	39
4.2 Resultados das medições	41
4.2.1 Resultados do parâmetro T_{30}	41
4.2.2 Resultados do parâmetro EDT	42
4.2.3 Zonamento da audiência do auditório para análise de D_{50} , RASTI e STI.....	42
4.2.4 Resultados de D_{50} , C_{80} , RASTI e STI.....	43
4.3 Medições objectivas da acústica da Sala dos Capelos.....	45
5 MODELO NUMÉRICO.....	46
5.1 Escolha da técnica de modelação computacional.....	46
5.2 Programa de cálculo a utilizar	47
5.3 Apresentação do modelo numérico	48
5.3.1 Dados de entrada da geometria	48
5.3.2 Materiais de revestimento e coeficientes de absorção sonora	51
5.3.3 Posição de fontes e de receptores	52
5.3.4 Características do ar (meio de propagação).....	53

5.3.5 Plano de Simetria	53
5.3.6 Imagens do modelo numérico	54
5.4 Calibração do modelo numérico	56
5.4.1 Parâmetros e objectivos da calibração do modelo numérico	56
5.4.2 Absorção do som no ar	57
5.4.3 Número de raios	58
5.4.4 Simulação 1 para calibração	59
5.4.5 Simulação 2 para calibração	61
5.4.6 Simulação 3 para calibração	63
6 ESTRATÉGIAS DE INTERVENÇÃO E SIMULAÇÕES	67
6.1 Desenvolvimento de estratégias de correcção acústica	67
6.1.1 Estratégia geral para o caso de estudo	67
6.1.2 Caso 1 – som reflectido no tecto abobadado da nave e coro alto	67
6.1.3 Caso 2 – som reflectido nas paredes de fundo da nave e coro alto.....	68
6.1.4 Caso 3 – controlo adicional do tempo de reverberação	69
6.1.5 Caso 4 – som dirigido à capela-mor	69
6.1.6 Caso 5 – som dirigido às capelas laterais	71
6.1.7 Caso 6 – ausência de elementos decorativos	73
6.2 Simulação da implementação de estratégias	74
6.2.1 Posições de Fontes e Receptores	75
6.2.2 Simulação A.....	77
6.2.3 Simulação B.....	79
6.2.4 Simulação C.....	81
6.2.5 Simulação D.....	83
6.2.6 Simulação E	86
6.2.7 Simulação F	88
6.2.8 Simulação G.....	90
6.2.9 Evolução de valores de parâmetros pelas simulações	92
6.3 Comparação com objectivos acústicos	94
6.3.1 Tempo de reverberação (TR)	94
6.3.2 Early Decay Time (EDT).....	95
6.3.3 Definição da palavra (D_{50}).....	96
6.3.4 Inteligibilidade da palavra (STI / RASTI)	96
7 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	97
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

ANEXO 1 - CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DA SALA DOS CAPELOS	A1-1
A1.1 Medições objectivas da acústica do caso de estudo	A1-1
A1.1.1 Equipamento	A1-1
A1.1.2 Características do ar (meio de propagação)	A1-1
A1.1.3 Posições de Fontes e de Receptores	A1-2
A1.2 Resultados das medições	A1-3
A1.2.1 Resultados do parâmetro T_{30}	A1-3
A1.2.2 Resultados do parâmetro EDT	A1-4
A1.2.3 Resultados de D_{50} , C_{80} , RASTI e STI.....	A1-4

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Reflectograma de um receptor, com indicação do som directo, primeiras reflexões e reflexões tardias. [1]	4
Figura 2.2 – Evolução do nível relativo total de pressão sonora em função da distância da fonte, normalizada relativamente à distância crítica D_c . [1]	6
Figura 2.3 – Gráficos de níveis relativos totais de pressão sonora correspondentes a uma sala “viva”, uma sala intermédia e uma sala “surda”. [1]	7
Figura 2.4 – Tempo de reverberação [2]	7
Figura 2.5 – Tempo de reverberação aparente [2]	8
Figura 2.6 – Interação do som com superfície [3]	10
Figura 2.7 - Coeficientes de absorção de uma solução mista com ressoador montado em forma de membrana e com material poroso na caixa-de-ar. [2]	12
Figura 2.8 – α_{sab} e α_{ey} calculados a partir da medição de TR de um espaço fechado [4].....	13
Figura 2.9 – Contribuição das frequências no nível da voz e na inteligibilidade da palavra [1]	15
Figura 2.10 – Evolução temporal da energia sonora correspondente à emissão de uma vogal seguida de uma consoante, num espaço fechado (segundo Kurtovic) [1]	16
Figura 2.11 – Relação entre EDT e TR [1]	18
Figura 2.12 – Fracção de energia que contribui para a inteligibilidade em função do seu atraso ao som directo (proposta de Lochner e Burger, 1961) [5]	19
Figura 2.13 – Traçado de raios de dispersão de um arco côncavo. A região arredondada vai receber mais reflexões que outras regiões [6]	20
Figura 3.1 – Igreja do Colégio de Santo Agostinho (ou Colégio da Sapiência)	23
Figura 3.2 – Planta baixa do auditório com marcações dos limites dos volumes	24
Figura 3.3 – Planta alta do auditório com marcações dos limites dos volumes	24
Figura 3.4 – Corte longitudinal do auditório com marcações dos limites dos volumes.....	25
Figura 3.5 – Perspectiva alta da Nave, da Capela-Mor e Nicho.....	27
Figura 3.6 – Perspectiva da Nave e do Coro Alto	28
Figura 3.7 – Panorâmica dentro da Capela-Mor, com Nicho e tecto em abóbada com baixos-relevos	29
Figura 3.8 – Panorâmica do Coro Alto.....	30
Figura 3.9 – Panorâmica das Capelas Laterais Sul.....	30

Figura 3.10 – Panorâmica das Capelas Laterais Norte.....	31
Figura 3.11 – Margem de valores recomendados de TRmid para sala de teatro ocupada, em função do volume, segundo Antoni Carrión Isbert [1]	35
Figura 3.12 – Margem de valores recomendados de TRmid para sala de teatro vazia, em função do volume, segundo Marshall Long [3]	36
Figura 4.1 – Medição de Temperatura e Humidade Relativa.....	38
Figura 4.2 – Planta do auditório com marcação das posições das 2 fontes e dos 7 receptores adoptados na medição acústica.....	39
Figura 4.3 – Perspectiva da Nave e Coro Alto, com Fonte na posição F1 e Receptor na posição R7 (Coro Alto).....	40
Figura 4.4 – Planta do auditório com marcação do zonamento da audiência	43
Figura 5.1 – Esquema de princípio evidenciando a Precisão e Eficiência dos métodos numéricos em função da frequência, segundo John Storyk [12]	47
Figura 5.2 – Exemplo das projecções ortogonais executadas - volume Nave (NVE).....	50
Figura 5.3 – Perspectiva do modelo do auditório	54
Figura 5.4 – Perspectiva do modelo do auditório	54
Figura 5.5 – Perspectiva do modelo do auditório a partir do interior da Capela-Mor.....	55
Figura 5.6 – Perspectiva do modelo do auditório a partir do Coro Alto.	55
Figura 5.7 – Gama de valores de tempo de reverberação para satisfação da calibração do modelo.....	57
Figura 5.8 – Resultados de TR da simulação 1 da fase de calibração	59
Figura 5.9 – Resultados da simulação 1 de EDT, D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI, e valores de medição acústica	60
Figura 5.10 – Resultados de TR da simulação 2 da fase de calibração.....	62
Figura 5.11 – Resultados da simulação 2 de EDT, D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI, e valores de medição acústica	63
Figura 5.12 – Resultados de TR da simulação 3 da fase de calibração	64
Figura 5.13 – Resultados de TR da simulação 3 da fase de calibração, e valores da medição	65
Figura 5.14 – Resultados da simulação 3 de EDT, D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI, e valores de medição acústica	66
Figura 6.1 – Concha acústica móvel no Disney Performance Hall	70
Figura 6.2 – Proposta de concha acústica	71
Figura 6.3 – Guardas de capelas laterais na igreja de S. Roque em Lisboa	72
Figura 6.4 – Proposta de guardas de capelas laterais em posição fechada.....	73
Figura 6.5 – Elementos expositivos e decorativos nas capelas laterais durante	

a cerimónia de inauguração	74
Figura 6.6 – Planta do auditório com marcação das novas posições das 3 fontes e dos 11 receptores.....	76
Figura 6.7 – Resultados da simulação A, de TR e EDT	77
Figura 6.8 – Resultados da simulação A, de D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI.....	78
Figura 6.9 – Resultados da simulação B, de TR e EDT	79
Figura 6.10 – Resultados da simulação B, de D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI.....	80
Figura 6.11 – Resultados da simulação C, de TR e EDT	81
Figura 6.12 – Resultados da simulação C, de D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI.....	82
Figura 6.13 – Resultados da simulação D, de TR e EDT	84
Figura 6.14 – Resultados da simulação D, de D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI.....	84
Figura 6.15 – Resultados da simulação E, de TR e EDT	86
Figura 6.16 – Resultados da simulação E, de D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI	87
Figura 6.17 – Resultados da simulação F, de TR e EDT.....	88
Figura 6.18 – Resultados da simulação F, de D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI.....	89
Figura 6.19 – Resultados da simulação G, de TR e EDT	90
Figura 6.20 – Resultados da simulação G, de D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI.....	91
Figura 6.21 – Evolução de T_{30} na implementação de estratégias	92
Figura 6.22 – Evolução de EDT na implementação de estratégias	92
Figura 6.23 – Evolução de D_{50} na implementação de estratégias	93
Figura 6.24 – Evolução de RASTI na implementação de estratégias	93
Figura 6.25 – Evolução de STI na implementação de estratégias	94
Figura A1.1 – Medição de Temperatura e Humidade Relativa.....	A1-1
Figura A1.2 – Planta do auditório com marcação das posições das 2 fontes e dos 7 receptores adoptados na medição acústica	A1-2
Figura A1.3 – Panorâmica da Sala dos Capelos, com Fonte na posição F1 e Receptor na posição R4	A1-2
Figura A1.4 – Panorâmica da Sala dos Capelos	A1-3

ÍNDICE DE QUADROS

Tabela 2.1 – Características mais relevantes da mensagem oral.....	14
Tabela 3.1 – Alterações ao projecto de execução de arquitectura.....	25
Tabela 3.2 – Levantamento de materiais por local.....	31
Tabela 4.1 – Valores médios de T_{30} por receptor, para a fonte F1.....	41
Tabela 4.2 – Valores médios de T_{30} por receptor, para a fonte F2.....	41
Tabela 4.3 – Média espacial de T_{30} , desvio padrão e repetibilidade $\sigma(T_{30})$	41
Tabela 4.4 – Média espacial dos valores medidos de EDT.....	42
Tabela 4.5 – Zonamento da audiência.....	42
Tabela 4.6 – Valores médios de D_{50} , C_{80} , RASTI e STI na zona A.....	44
Tabela 4.7 – Valores médios de D_{50} , C_{80} , RASTI e STI na zona B.....	44
Tabela 4.8 – Valores de D_{50} , C_{80} , RASTI e STI na zona C.....	44
Tabela 5.1 – Codificação dos volumes da igreja, números para identificação de cantos e de planos, e nomes de ficheiros atribuídos.....	48
Tabela 5.2 – nº de dados geométricos do modelo por cada volume e os totais.....	50
Tabela 5.3 – Caracterização do coeficiente de absorção sonora de materiais de revestimento.....	52
Tabela 5.4 – Objectivo na calibração do modelo numérico. TR de medição e desvio absoluto máximo. Gama de valores admissíveis.....	56
Tabela 5.5 – Valores de absorção do som no ar.....	58
Tabela 5.6 – Resultados de TR da simulação 1 da fase de calibração.....	59
Tabela 5.7 – Novos valores de coeficientes de absorção sonora de dois materiais de revestimento.....	61
Tabela 5.8 – Resultados de TR da simulação 2 da fase de calibração.....	61
Tabela 5.9 – Novos valores de coeficientes de absorção sonora de dois materiais de revestimento.....	63
Tabela 5.10 – Resultados de TR da simulação 3 da fase de calibração.....	64
Tabela 5.11 – Valores médios de absorção sonora, dos planos do modelo calibrado.....	66
Tabela 6.1 – Lista de simulações para implementação de estratégias.....	75

Tabela 6.2 – Resultados da simulação A	77
Tabela 6.3 – Valores médios de absorção sonora dos planos do modelo na simulação A	78
Tabela 6.4 – Resultados da simulação B	79
Tabela 6.5 – Valores médios de absorção sonora dos planos do modelo na simulação B	80
Tabela 6.6 – Valores de coeficientes de absorção sonora de sistema Baswaphon	81
Tabela 6.7 – Resultados da simulação C	81
Tabela 6.8 – Valores médios de absorção sonora dos planos do modelo na simulação C	82
Tabela 6.9 – Valores de coeficientes de absorção sonora das faces da concha acústica	83
Tabela 6.10 – Resultados da simulação D	83
Tabela 6.11 – Valores médios de absorção sonora dos planos do modelo na simulação D	85
Tabela 6.12 – Resultados da simulação E	86
Tabela 6.13 – Valores médios de absorção sonora dos planos do modelo na simulação E	87
Tabela 6.14 – Valores de coeficientes de absorção sonora de cadeiras almofadadas vazias ..	88
Tabela 6.15 – Resultados da simulação F	88
Tabela 6.16 – Valores médios de absorção sonora dos planos do modelo na simulação F	89
Tabela 6.17 – Valores de coeficientes de absorção sonora de cadeiras almofadadas vazias ..	90
Tabela 6.18 – Resultados da simulação G	90
Tabela 6.19 – Valores médios de absorção sonora dos planos do modelo na simulação G	91
Tabela 6.20 – Rácio EDT / TR	95
Tabela 6.21 – Valores médios de absorção sonora dos planos do modelo na simulação G	96
Tabela A1.1 – Valores médios de T_{30} por receptor, para a fonte F1	A1-3
Tabela A1.2 – Média espacial de T_{30} , desvio padrão e repetibilidade $\sigma(T_{30})$	A1-4
Tabela A1.3 – Média espacial dos valores medidos de EDT	A1-4
Tabela A1.4 – Valores médios de D_{50} , C_{80} , RASTI e STI na zona A	A1-4

SIMBOLOGIA

A_{tot} – área de absorção total equivalente

°C – graus Celsius

C_{80} – claridade musical

D_{50} – definição da palavra

$D_{50(500\text{Hz},2\text{kHz})}$ – média de definição da palavra das bandas de oitava de 500 Hz e 2 kHz

D_c – distância crítica

dB – decibel

E – energia sonora

EDT – Early Decay Time

f_c – frequência crítica ou frequência de Helmholtz

F_i – posição de fonte sonora

HR – Humidade Relativa

Hz – Hertz

L_D – nível de pressão sonora de campo directo

L_p – nível de pressão sonora

L_R – nível de pressão sonora de campo reverberante

m – metro

m^2 – metro quadrado

m^3 – metro cúbico

mm – milímetros

ms – milissegundos

Q – factor de directividade de fonte sonora

R – constante da sala

R_i – posição de receptor sonoro

RASTI – Rapid Speech Transmission Index

s – segundos

S – área

S_i ou S_{tot} – superfície total da sala

SPL – nível de pressão sonora

STI – Speech Transmission Index

T – Temperatura

T_{60} – tempo de reverberação medido, baseado numa avaliação de 60dB de variação

T_{30} – tempo de reverberação medido, baseado numa avaliação de 30dB de variação

TR – tempo de reverberação

TR_{mid} – média de tempo de reverberação das bandas de oitava de 500 Hz e 1 kHz

$TR_{Máx}$ – tempo de reverberação máximo

$TR_{mín}$ – tempo de reverberação mínimo

V – volume

$\alpha_{médio}$ – coeficiente de absorção sonora médio

α_{sab} – coeficiente de absorção sonora para uso na fórmula de Sabine

α_{ey} – coeficiente de absorção sonora para uso na fórmula de Eyring

$\sigma(T_{30})$ – repetibilidade

ABREVIATURAS

CATT – Computer Aided Theatre Technique

EN – European Norm

ISO – International Organization for Standardization

NP – Norma Portuguesa

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A reabilitação e requalificação do património edificado tem vindo a assumir um peso crescente na construção em Portugal. Em edifícios antigos, em particular quando se pretende uma alteração profunda das suas funções e a adaptação a recintos com elevadas exigências de conforto acústico, como são exemplo os auditórios e grandes salas polivalentes, é fundamental um estudo de condicionamento acústico aprofundado e uma forte interacção com as restantes especialidades envolvidas, garantindo a manutenção do valor patrimonial do edifício.

Quando os edifícios se revestem de adicional importância, como é o caso de edifícios com elevado valor histórico, há especificidades que requerem investigação adicional nos âmbitos da história e da arquitectura.

Neste contexto, pretende-se com o presente trabalho dar um contributo na definição de procedimentos e estratégias para o estudo de soluções de reabilitação acústica enquadráveis em edifícios e espaços de valor histórico.

1.2 Objectivos

O objectivo principal desta dissertação é o de encontrar estratégias de condicionamento acústico adequadas à reabilitação de salas e edifícios de elevado valor histórico. Para atingir tal, é necessário cumprir outros objectivos que a seguir se abordam, e que serão praticados sobre o caso de estudo desta dissertação.

Será necessário estabelecer procedimentos de análise do campo sonoro existente e de identificação de desafios acústicos presentes.

Será necessário conhecer o programa da reabilitação e a função que o espaço desempenhará após a reabilitação e que poderá ser nova ou a mesma, e perceber as necessidades do utilizador final do espaço.

Será necessário identificar os objectivos acústicos e determinar métricas de qualidade acústica adequadas aos objectivos.

Será necessário investigar a história do local para conhecer as limitações na procura de soluções, por forma a respeitar o valor histórico e compatibilizar as estratégias com a arquitectura original e a arquitectura da reabilitação. Estas limitações podem ocorrer ao nível de elementos móveis ou fixos, de tipos de materiais e aparência, de contemporaneidade e anacronismo.

Será necessário definir, materializar e testar virtualmente estratégias para as soluções de reabilitação acústica a adoptar.

1.3 Organização do trabalho

No presente trabalho, começa-se por apresentar e contextualizar os objectivos aqui abordados.

No Capítulo 2 relembram-se alguns conceitos fundamentais da acústica, pertinentes para este estudo e procura-se o estado da arte no que respeita aos objectivos apresentados, quer a um nível detalhado, ou a um nível mais holístico.

No Capítulo 3 faz-se uma apresentação do caso de estudo, o edifício da igreja do Colégio da SS. Trindade, ao nível histórico, da caracterização geométrica e de materiais existentes, identificação de desafios acústicos e definição de objectivos acústicos.

No Capítulo 4 apresentam-se a caracterização acústica do campo sonoro do espaço, com os resultados das medições efectuadas no local.

No Capítulo 5 constrói-se o modelo computacional que servirá para simular as estratégias de intervenção a desenvolver. Ainda neste capítulo, o modelo é calibrado para os tempos de reverberação medidos, por bandas de oitava.

No Capítulo 6 desenvolvem-se estratégias de intervenção e materializam-se soluções que são depois testadas no modelo computacional desenvolvido. Comparam-se ainda, os resultados com os objectivos traçados.

No Capítulo 7 tecem-se conclusões e perspectivam-se desenvolvimentos futuros.

O Anexo 1 apresenta a caracterização acústica de outro espaço de elevado valor histórico: a Sala de Grandes Actos da Universidade de Coimbra, também conhecida por Sala dos Capelos.

2 ESTADO DA ARTE

Este documento foi escrito considerando que o leitor está familiarizado com os conceitos base da acústica. Convém no entanto, recordar alguns conceitos com interesse directo para esta dissertação. Tais conceitos são abordados nos capítulos seguintes.

2.1 Propagação do som em espaços fechados

A energia radiada por uma fonte sonora num espaço fechado, chega a um ouvinte situado em um qualquer ponto desse mesmo espaço, de duas formas diferentes: uma parte da energia chega de forma directa (som directo), como se a fonte e receptor estivessem em campo aberto, enquanto outra parte chega por via indirecta (som reflectido), depois de sucessivas reflexões que a onda sonora sofre quando atinge as diferentes superfícies do recinto [1].

Num qualquer ponto do espaço fechado, a energia correspondente ao som directo depende exclusivamente da distância à fonte sonora, enquanto a energia associada a cada reflexão depende do caminho percorrido pelo raio sonoro, assim como o grau de absorção acústica dos materiais utilizados como revestimento das superfícies intervenientes.

Logicamente, quanto maior for a distância percorrida e mais absorvente sejam os materiais empregues, menor será a energia associada tanto ao som directo como às sucessivas reflexões.

2.1.1 Som reflectido

Ao analisar a evolução temporal do som reflectido num qualquer ponto do espaço fechado em estudo, observam-se duas zonas de características notavelmente diferenciadas: uma primeira zona que engloba todas aquelas reflexões que chegam imediatamente depois do som directo e que recebem o nome de primeiras reflexões (“early reflections”), e uma segunda formada por reflexões tardias que constituem a cauda reverberante.

Embora a chegada de reflexões ao ponto em questão se produza de forma contínua, e portanto sem alterações bruscas, também é certo que as primeiras reflexões chegam de forma mais discretizada que as tardias, pois tratam-se de reflexões de baixa ordem (habitualmente, ordem ≤ 3). Diz-se que uma reflexão é de ordem “n” quando o raio sonoro associado incidiu “n” vezes sobre as diferentes superfícies do recinto antes de chegar ao receptor.

De um ponto de vista prático, é geralmente estabelecido um limite temporal para a zona das primeiras reflexões de aproximadamente 100 ms desde a chegada do som directo, ainda que esse valor varie em cada caso concreto, em função da forma e do volume do recinto. A representação gráfica temporal da chegada das diversas reflexões, acompanhadas do seu nível energético correspondente, denomina-se reflectograma. Na Figura 2.1 representa-se de forma esquemática a chegada dos diferentes raios sonoros até um receptor juntamente com o reflectograma associado, com indicação do som directo, da zona de primeiras reflexões e a zona das reflexões tardias (cauda reverberante) [1].

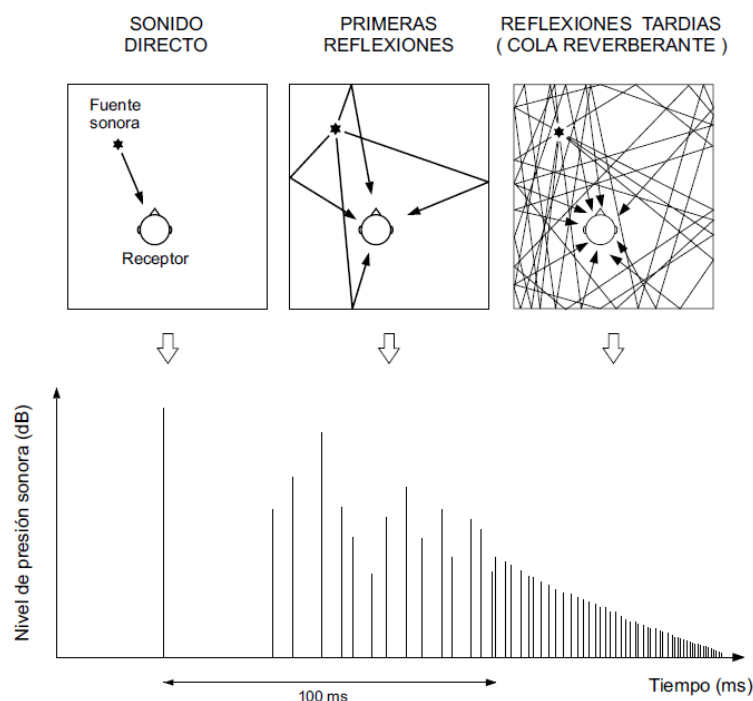


Figura 2.1 – Reflectograma de um receptor, com indicação do som directo, primeiras reflexões e reflexões tardias. [1]

2.1.2 Relação entre campo directo e campo reverberante. Nível total de pressão sonora.

Admitindo uma situação de regime permanente de nível sonoro e aplicando exclusivamente a teoria da acústica estatística, a energia sonora total presente em cada ponto de uma sala, obtém-se pela soma de uma energia variável que depende da localização do ponto, e de outra de valor constante que não depende da localização na sala. Admite-se uma fonte sonora de directividade conhecida, que irradia uma potência constante [1].

A energia de valor variável corresponde ao som directo e diminui à medida que o receptor se afasta da fonte, enquanto a energia de valor constante corresponde ao som indirecto ou reflectido. O facto de essa energia não depender da localização na sala, provém da aplicação da teoria estatística a todo o som reflectido e em consequência, de tratar por igual todas as

reflexões, sejam primeiras ou tardias (cauda reverberante). Esta hipótese conduz a resultados naturalmente aproximados, se bem que apresenta a vantagem da simplicidade de cálculo da energia total.

Habitualmente não se trabalha em termos de energia, mas sim de nível de pressão sonora SPL, o qual é totalmente equivalente. Isto deve-se a que na prática, o nível SPL é facilmente mensurável.

Portanto, de acordo com o exposto, a pressão sonora total num ponto qualquer de um espaço fechado obtém-se a partir das contribuições da pressão sonora do som directo (diminui com a distância à fonte) e do som reflectido (mantém-se constante).

A zona onde predomina o som directo denomina-se campo directo. Pertencem a essa zona todos os pontos mais próximos da fonte sonora e nela o nível de pressão sonora, chamado nível de campo directo L_D , diminui 6 dB cada vez que dobra a distância à fonte. É como se o receptor estivesse situado em campo aberto.

A zona onde predomina o som reflectido recebe o nome zona de campo reverberante. A ela pertencem os pontos mais afastados da fonte sonora. Nesta zona, o nível de pressão sonora, denominado nível de campo reverberante L_R , mantém-se constante.

A distância para a qual $L_D = L_R$ denomina-se distância crítica D_c . Pode-se verificar que:

$$D_c = 0,14 \sqrt{Q R} \quad (2.1)$$

Q – factor de directividade da fonte sonora na direcção considerada

R – constante da sala = $\frac{S_t \alpha_{médio}}{1 - \alpha_{médio}}$

S_t – Superfície total da sala (m^2)

$\alpha_{médio}$ – coeficiente de absorção médio da sala

Na Figura 2.2 mostra-se a evolução do nível relativo total da pressão sonora em função da distância da fonte, normalizada relativamente à distância crítica D_c .

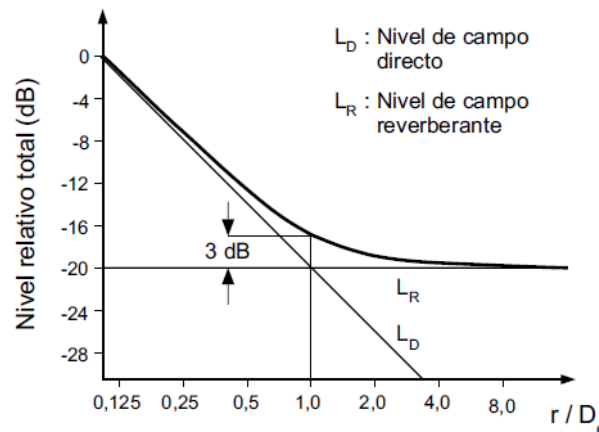


Figura 2.2 – Evolução do nível relativo total de pressão sonora em função da distância da fonte, normalizada relativamente à distância crítica D_c . [1]

Pode-se verificar que para pontos próximos da fonte sonora ($\frac{r}{D_c} \ll 1$):

$$L_p \approx L_D$$

Enquanto para pontos afastados ($\frac{r}{D_c} \gg 1$):

$$L_p \approx L_R$$

Por outro lado, verifica-se que quanto maior seja o valor da absorção de um espaço fechado, a uma determinada frequência, maior será o valor da constante da sala R (aumento da distância crítica D_c) e menor o nível de pressão sonora do campo reverberante L_R . A título de exemplo, na Figura 2.3 representam-se 3 gráficos de níveis relativos totais de pressão sonora correspondentes a uma sala “viva” (com pouca absorção), uma sala intermédia e uma sala “surda” (com muita absorção), em função da distância à fonte sonora.

Pode observar-se que efectivamente:

$$L_{R1} > L_{R2} > L_{R3}$$

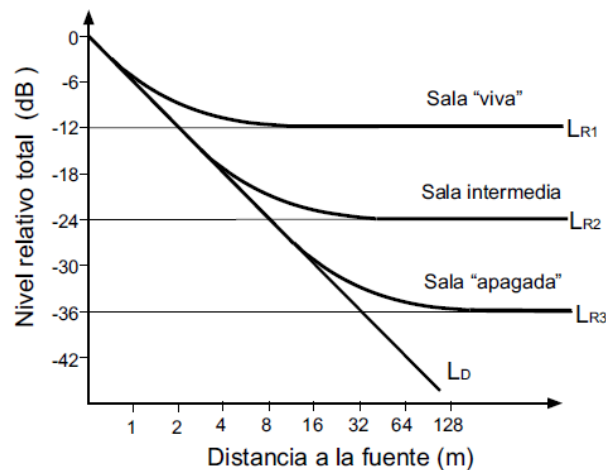


Figura 2.3 –Gráficos de níveis relativos totais de pressão sonora correspondentes a uma sala “viva”, uma sala intermédia e uma sala “surda”. [1]

2.2 Tempo de reverberação e relação com a absorção

2.2.1 Conceito

O tempo de reverberação é o parâmetro mais utilizado na avaliação da qualidade acústica interior de espaços fechados. A preferência pelo tempo de reverberação resulta, essencialmente, da facilidade da sua utilização e da não existência de outro critério eficaz e simultaneamente simples de ser determinado.

Por definição, o tempo de reverberação (TR) corresponde ao intervalo de tempo necessário para se verificar um decrescimento do nível sonoro de 60 dB (redução de 1 milhão de vezes da sua intensidade sonora), após a paragem da fonte sonora (Figura 2.4) [2].

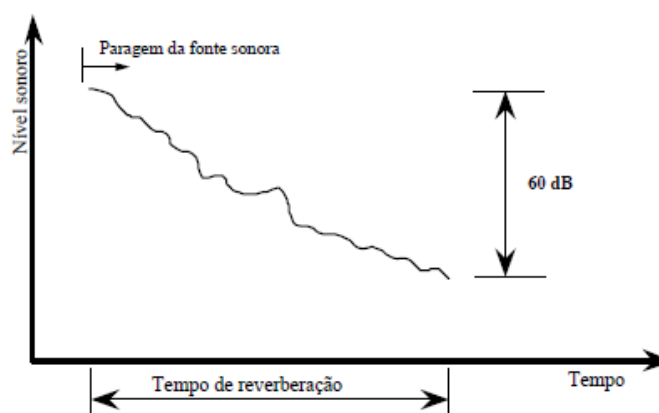


Figura 2.4 – Tempo de reverberação [2]

Em termos matemáticos o tempo de reverberação corresponde a uma diminuição de energia sonora de,

$$E_{t=tr} = E_0 10^{-6} \quad (2.2)$$

onde E_0 é a energia existente no momento da paragem da fonte.

2.2.2 Medição

Na prática, a medição da redução no nível sonoro de 60 dB pode não ser possível, caso o ruído de fundo existente seja elevado. Considere-se, por exemplo, que o nível sonoro na presença de uma fonte sonora atinge 90 dB, numa determinada banda de frequências, enquanto que o ruído de fundo atinge 50 dB. Ao ser desligada a fonte sonora a redução no nível sonoro limita-se a 40 dB (90-50). Perante este cenário apenas é possível determinar uma duração aparente de reverberação, inferior ao tempo de reverberação conforme esquema representação na Figura 2.5.

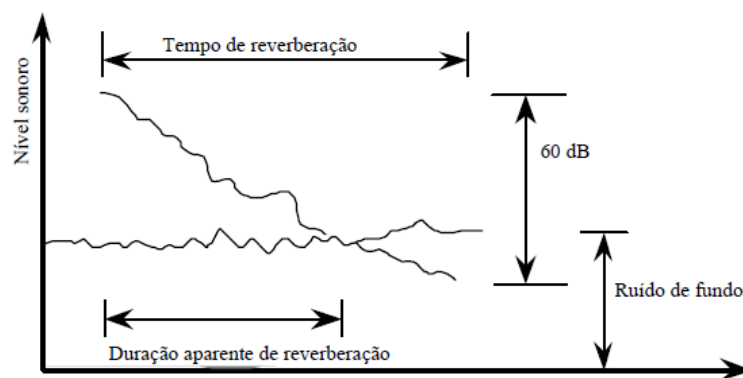


Figura 2.5 – Tempo de reverberação aparente [2]

O cálculo real do tempo de reverberação, em situações em que não é possível obter uma quebra no nível sonoro de 60 dB, requer a utilização de processos de cálculo, que permitam avaliar o tempo necessário para que o nível sonoro baixe 60 dB.

Na resolução deste problema, utilizam-se com frequência, na prática, dois métodos: o método tradicional e o método de Schroeder.

Método tradicional

Neste método é criado artificialmente um campo sonoro constante no interior do compartimento em análise, com o auxílio de uma fonte sonora que é possível ser controlada. Após interrupção súbita, em cada banda de frequências é medido, com um instrumento adequado (por exemplo um sonómetro com filtros) o abaixamento do nível sonoro. Feitos os registos gráficos destes níveis sonoros, procede-se ao prolongamento aproximado das rectas

de queda do nível sonoro, recorrendo-se a uma régua apropriada que permite de forma gráfica obter os valores de TR nas diversas frequências ou bandas de frequências.

Método de Schroeder

Neste caso são gerados diferentes pulsos de ruído, com conteúdos em frequência distintos, ricos nas várias bandas de frequência. Os tempos de reverberação são então avaliados a partir da resposta da sala a essas excitações. Este método de medição requer o uso de uma fonte sonora, controlada por um sonómetro, ou analisador, através de uma ligação com um cabo adequado. Este equipamento de medição terá que estar munido de filtros e um módulo de cálculo de tempos de reverberação que permita automaticamente medir os valores de TR nas diversas bandas de frequências (figura 4.9). Este método exige medições em vários pontos da sala (pelo menos em três pontos), sendo o valor de TR da sala, para cada frequência, a média aritmética dos valores de TR medidos nos vários pontos. Este método revela-se mais rigoroso e mais rápido do que o método tradicional. O tempo de reverberação, quando as quedas no nível sonoro são inferiores a 60 dB, é extrapolado a partir de diferentes reduções no nível sonoro: 40 dB, 30 dB e 20 dB. Estes valores são normalmente designado por TR₄₀, TR₃₀ e TR₂₀ respectivamente. Se no final das medições os valores de TR₄₀, TR₃₀ e TR₂₀ forem diferentes de zero, nas diversas frequências, o valor mais correcto para TR corresponde ao TR₄₀, já que este foi extrapolado para a maior queda do nível de ruído [2].

2.2.3 Cálculo

Existem várias fórmulas para o cálculo teórico do tempo de reverberação, porém a fórmula clássica por excelência e aceite como de referência a nível internacional pela sua simplicidade de cálculo, é a denominada fórmula de Sabine [1]. A correspondente expressão matemática, obtida aplicando a teoria acústica estatística e considerando a absorção produzida pelo ar, é a seguinte:

$$TR = 0,161 \frac{V}{A_{tot} + 4mV} \quad (2.3)$$

V – Volume do local (m³)

A_{tot} – Área de absorção equivalente total (m²)

m – coeficiente de atenuação do som no ar (m⁻¹)

A fórmula de Eyring resulta do modelo que considera que um raio sonoro sofre a mesma atenuação sempre que sofre uma reflexão [2].

$$TR = 0,07 \frac{V}{-S \log(1 - \alpha_{médio})} \quad (2.4)$$

V – Volume do local (m³)

S – Superfície total do local (m^2)

$\alpha_{\text{médio}}$ – coeficiente de absorção médio da envolvente da sala

2.3 Absorção sonora

2.3.1 Conceito

Quando ondas sonoras interagem com materiais, a energia contida na onda incidente é reflectida, transmitida através do material e dissipada internamente no material. O balanço de energia está escrito na equação (2.5) e ilustrado na Figura 2.6 [3].

$$E_i = E_r + E_t + E_a \quad (2.5)$$

E_i - Energia incidente

E_r - Energia reflectida

E_t - Energia transmitida

E_a - Energia dissipada

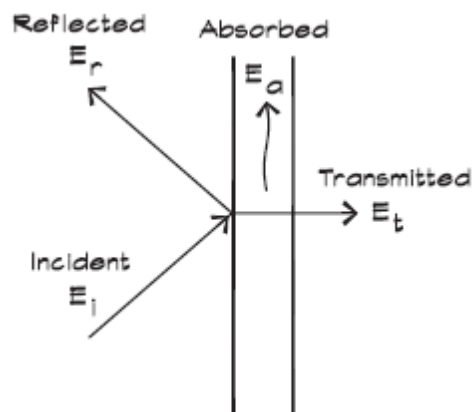


Figura 2.6 – Interação do som com superfície [3]

Como esta análise envolve apenas a interação na fronteira do material, a diferença entre a dissipação, onde a energia é transformada em calor, e a transmissão, onde a energia atravessa o material, não é relevante. Ambos os mecanismos são absorventes do ponto de vista da onda incidente, uma vez que essas energias não são reflectidas. E porque aqui apenas interessa a fronteira do lado incidente, podemos combinar a energia transmitida com a energia dissipada. Dividindo a equação (2.5) por E_i ,

$$1 = \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_{t+a}}{E_i} \quad (2.6)$$

Podemos exprimir cada rácio de energia como um coeficiente de reflexão ou de transmissão. A fracção de energia incidente que é absorvida (dissipada e transmitida) na fronteira da superfície é o coeficiente,

$$\alpha_{\theta} = \frac{E_{t+a}}{E_i} \quad (2.7)$$

E o coeficiente de reflexão é,

$$\alpha_r = \frac{E_r}{E_i} \quad (2.8)$$

Substituindo estes coeficientes na equação (2.6) temos,

$$1 = \alpha_{\theta} + \alpha_r \quad (2.9)$$

O coeficiente de reflexão pode ser expresso pelo rácio complexo da amplitude de reflexão, r , para pressão,

$$\alpha_r = r^2 \quad (2.10)$$

E o coeficiente de absorção é,

$$\alpha_{\theta} = 1 - r^2 \quad (2.11)$$

A energia reflectida é,

$$E_r = (1 - \alpha_{\theta})E_i \quad (2.12)$$

2.3.2 Mecanismos de absorção

Todos os materiais absorvem energia sonora em maior ou em menor quantidade [2]. Entre os materiais e sistemas com maior capacidade de absorção é habitual distinguirem-se três grandes categorias:

- Materiais porosos ou fibrosos, mais eficazes nas altas frequências ≈ 1600 Hz a 6400 Hz
- Membranas, mais eficazes nas baixas frequências ≈ 100 Hz a 400 Hz
- Ressonadores, mais eficazes nas médias frequências ≈ 400 Hz a 1600 Hz

Destes, os materiais porosos são os mais comumente encontrados, como lã-de-vidro, lã-mineral, painéis de fibras de madeira, aparas de madeira prensada, algodão, feltro, espuma de neoprene de célula aberta, carpete, metal sinterizado e muitos outros produtos.

As membranas são painéis leves e não porosos, sólidos ou perfurados, com uma caixa-de-ar no seu tardo, que pode ser preenchida com material poroso como lã-de-vidro.

Os ressoadores podem ser partições ligeiras vibrando na sua massa-ar-massa ressonância ou podem ser ressoadores de Helmholtz ou outros espaços fechados semelhantes, que absorvam som na gama de frequências imediatas à frequência de ressonância. Também podem ter os espaços preenchidos por materiais porosos [3].

Um sistema de materiais pode combinar os 3 mecanismos de absorção (Figura 2.7).

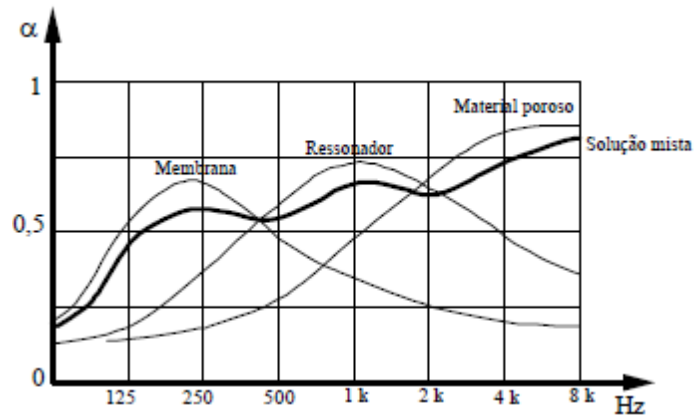


Figura 2.7 - Coeficientes de absorção de uma solução mista com ressonador montado em forma de membrana e com material poroso na caixa-de-ar. [2]

2.3.3 Coeficientes de absorção sonora

De acordo com Beranek [4], se usarmos as equações de Sabine e de Eyring para prever o tempo de reverberação do mesmo espaço, temos:

$$\frac{0,161 V}{S_{\text{tot}} \alpha_{\text{sab}} + 4mV} = T_{60} = \frac{0,161 V}{S_{\text{tot}} \{-2,3 \log(1 - \alpha_{\text{ey}})\} + 4mV} \quad (2.13)$$

α_{sab} – coeficiente de Sabine

α_{ey} – coeficiente de Eyring

Então,

$$\alpha_{\text{sab}} = -2,3 \log(1 - \alpha_{\text{ey}}) \quad (2.14)$$

Isto significa que se α_{sab} é conhecido, α_{ey} é automaticamente conhecido.

Então, $(\alpha_{\text{ey}} / \alpha_{\text{sab}})$ é conhecido.

Aqui, Beranek questiona o leitor: e o que significa dizer que ambas as equações prevêm o mesmo valor de T_{60} ?

Considere-se o caso de $T_{60} = 0$.

Na equação de Eyring, $T_{60} = 0$ quando $\alpha_{ey} = 1$.

Na equação de Sabine, $T_{60} = 0$ apenas se α_{sab} for um valor muito elevado.

Isto implica que o coeficiente de absorção de Sabine tenha de exceder 1.

Esta é a premissa apresentada por Beranek.

Aquele autor apresenta ainda um gráfico retirado de um artigo do *Journal of the Acoustical Society of America*, de Hodgson, M. R., com os valores de α_{sab} e de α_{ey} calculados a partir da medição de tempo de reverberação de um espaço fechado (3,17 x 2,60 x 1,95 m³) com todas as paredes cobertas com painéis de fibra de vidro com 13,5mm de espessura.

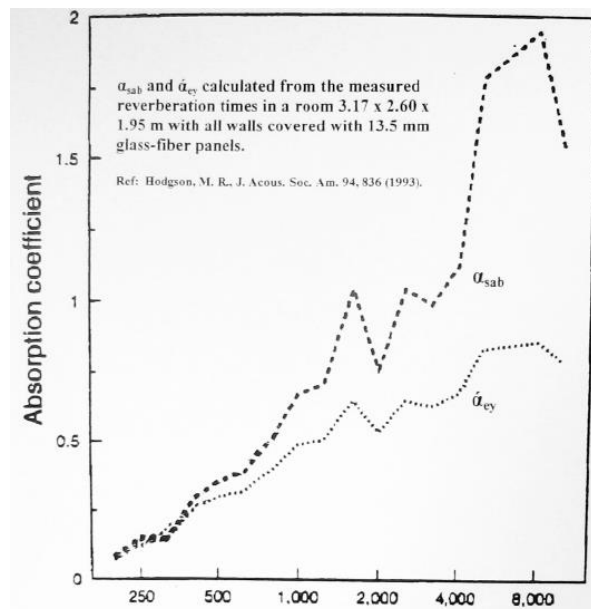


Figura 2.8 – α_{sab} e α_{ey} calculados a partir da medição de TR de um espaço fechado [4]

Note-se como as duas linhas do gráfico da Figura 2.8 progridem da mesma forma, isto é, com os picos e vales concordantes, mas com escala diferente para as mesmas frequências. Deve notar-se ainda que o máximo valor de coeficiente de absorção de Sabine fica perto de atingir o valor 2, enquanto o valor de coeficiente de absorção de Eyring nunca atinge a unidade.

2.4 Palavra (discurso oral)

2.4.1 Características

Quando uma pessoa emite uma mensagem, emprega maior tempo na emissão de vogais que em consoantes. É por essa razão que as vogais constituem o chamado regime permanente da fala, enquanto as consoantes se associam ao regime transitório [1].

A duração média de uma vogal é da ordem dos 90 ms, enquanto a de uma consoante é da ordem dos 20 ms.

O facto de a duração das vogais ser maior, faz com que o nível de pressão sonora associado a elas seja, em média, na ordem dos 12 dB maior que o correspondente nas consoantes. Por outro lado, o seu conteúdo é mais rico em baixas frequências, enquanto as consoantes dão maior contributo nas altas frequências.

Por outro lado, o grau de inteligibilidade da palavra está estreitamente relacionado com a correcta percepção das altas frequência. Em consequência, são as consoantes que determinam a compreensão da mensagem oral. Em contrapartida, a informação contida nas vogais é redundante. Na Tabela 2.1 resumem-se as características mencionadas.

Tabela 2.1 – Características mais relevantes da mensagem oral

	Duração (média)	Frequências Dominantes	Nível Sonoro (média)	Contribuição para a Inteligibilidade da Palavra
Vogais	≈ 90 ms	baixas frequências	Nível das vogais ≈ nível das consoantes +12 dB	baixa
Consoantes	≈ 20 ms	altas frequências		alta

Na Figura 2.9 mostra-se a contribuição de cada banda de oitava de frequências para o nível da voz e para a inteligibilidade da palavra.

Como se pode observar, a máxima contribuição para o nível da voz situa-se na zona das médias frequências, destacando-se a banda de 500 Hz com 46%. Por outro lado, a máxima contribuição para a inteligibilidade da palavra está situada a frequências mais elevadas (57% somando as contribuições das banda de 2 e 4 kHz) [1].

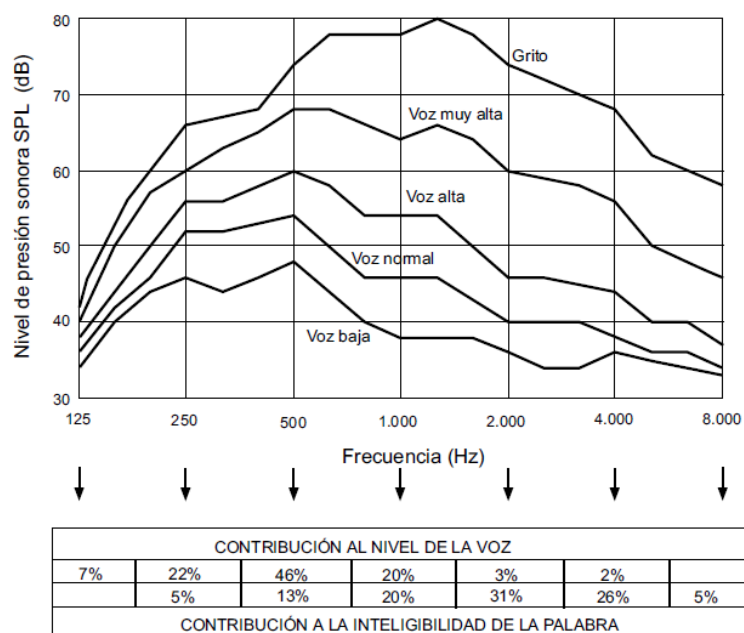


Figura 2.9 – Contribuição das frequências no nível da voz e na inteligibilidade da palavra [1]

2.4.2 Relação entre o Tempo de Reverberação e a inteligibilidade da palavra

De seguida explica-se porque é que num espaço fechado muito “vivo”, a palavra é ininteligível.

Como se explanou no capítulo anterior, ao emitir uma mensagem oral, a duração das vogais e o seu nível de pressão sonora é maior que o das consoantes. Além disso, as vogais são mais ricas em baixas frequências, enquanto as consoantes apresentam maior conteúdo nas altas frequências.

Numa sala com tempo de reverberação alto, o decaimento energético de uma vogal emitida na mesma, é apreciavelmente mais lento que o seu decaimento próprio (aquele que se observaria se a vogal fosse emitida em campo aberto). Tal facto, juntamente com a maior duração e nível comentados anteriormente, provoca uma sobreposição temporal da vogal com a consoante emitida imediatamente depois, como se observa na Figura 2.10.

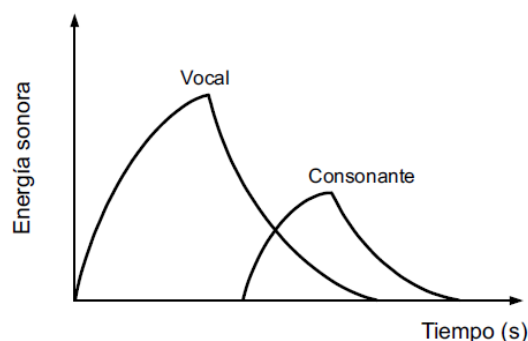


Figura 2.10 – Evolução temporal da energia sonora correspondente à emissão de uma vogal seguida de uma consoante, num espaço fechado (segundo Kurtovic) [1]

A simultaneidade temporal da vogal e da consoante com os seus níveis correspondentes, assim como as características espectrais de ambos os sons, são a causa do mascaramento parcial ou total da consoante, provocado pela vogal. Adiciona ainda o facto de um tom de baixa frequência e nível elevado, mascarar outro tom de frequência mais elevada e nível inferior.

Finalmente, uma vez que o grau de inteligibilidade está estreitamente ligado à correcta percepção das consoantes devido ao seu rico conteúdo em altas frequências, o mascaramento daquelas devido a um excesso de reverberação provoca inevitavelmente a perda da inteligibilidade na sala [1].

2.5 Medidas objectivas para palavra

Os parâmetros de medição acústicos mais relevantes para palavra, são o tempo de reverberação (TR), definição da palavra (D_{50}) e Speech Transmission Index (STI). O parâmetro TR já foi apresentado na secção 2.2 e a sua relação com a inteligibilidade da palavra discutida na secção 2.4.2. Apresentam-se ainda os parâmetros EDT e rácio de Lochner e Burger.

2.5.1 Definição da Palavra – D_{50}

Segundo Thiele, a definição da palavra (do alemão “Deutlichkeit”) é a relação entre a energia que chega ao ouvinte nos primeiros 50 ms após a chegada do som directo (inclui som directo e primeiras reflexões) e a energia total recebida pelo mesmo. Calcula-se em cada banda de frequências entre 125 Hz e 4 kHz:

$$D_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{0,05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.15)$$

O valor deste parâmetro em cada ponto de uma sala ocupada deve ser superior a 0,50. Quanto mais elevado, melhor é a inteligibilidade da palavra na sala.

Este parâmetro varia com a posição do orador no palco, sendo melhor quando enfrenta a audiência e piorando quando realiza uma rotação. Idealmente um projecto tentará conseguir que este parâmetro se mantenha constante, independentemente da posição do orador no palco.

2.5.2 Speech Transmission Index – STI

A ideia que serve de base a este parâmetro é que para boa inteligibilidade, a envolvente do sinal deve ser preservada (Houtgast et al., 1980). Para medir a distorção da envolvente, um sinal sonoro é modulado de forma sinusoidal. As frequências da modulação usadas estão entre 0,4 Hz e 20 Hz, que são as frequências da envolvente relevantes para palavra (o número típico de sons num discurso é 15 por segundo, isto é, uma frequência de modulação de 15 Hz). O sinal sonoro é 100% modulado de forma a que para uma modulação de 10 Hz existe um instante de silêncio a cada 0,1 s.

O sinal recebido numa sala contém algum som nos momentos mais calmos, devido ao efeito de arrastamento da resposta impulsiva da sala e qualquer ruído de fundo. A profundidade da modulação do sinal recebido é medida numa série de frequências de modulação, para dar a função de transferência de modulação (MTF). As várias MTF nas diferentes frequências do sinal são depois usadas para calcular o STI. Se o nível de som utilizado na medição corresponder ao da voz humana, claramente o STI medido leva em conta ambos os aspectos, de resposta impulsiva e de ruído de fundo, da inteligibilidade da palavra [5].

2.5.3 Rapid Speech Transmission Index – RASTI

RASTI é uma aproximação ao parâmetro completo STI, medido fazendo apenas 9 das 98 modulações. Duas bandas de oitava, 500 Hz e 2000 Hz são amostradas. A 500 Hz, são medidos valores para modulações de 1, 2, 4 e 8 Hz. A 2000 Hz, cinco modulações de frequências são medidas, 0,7, 1,4, 2,8, 5,6 e 11,2 Hz [3].

2.5.4 Early Decay Time – EDT

O EDT, tempo de decaimento inicial, define-se como seis vezes o tempo que decorre entre o momento em que a fonte deixa de emitir, até que o nível de pressão sonora desce 10 dB (Figura 2.11). Tal como no caso do TR, EDT varia em função da frequência [1].

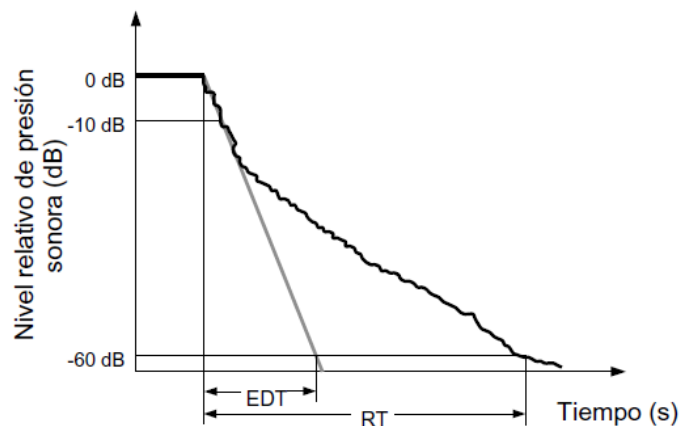


Figura 2.11 – Relação entre EDT e TR [1]

Este parâmetro tem sido considerado, nalguns estudos, como um dos mais importantes na percepção auditiva do ser humano [2].

2.5.5 Rácio de Lochner e Burger

Apresenta-se um outro parâmetro de inteligibilidade, que apesar de não ser calculado nesta dissertação, os pressupostos em que se apoia têm interesse para o estudo.

Baseados em ensaios de inteligibilidade em campos sonoros simulados, Lochner e Burger (1961) propuseram um factor de ponderação para a energia das reflexões iniciais. A energia útil considerada foi a que chega até 95 ms após a chegada do som directo, e a sua inteligibilidade é dada multiplicando a energia pelo factor de ponderação dependendo do seu atraso de chegada (Figura 2.12). A energia prejudicial é a que chega após 95 ms do som directo. O rácio de Lochner e Burger é expresso em decibel decorrente do rácio entre nível sonoro útil e prejudicial [5].

$$\text{Rácio Lochner e Burger} = 10 \log \frac{\int_0^{0,095} \alpha(t) p^2(t) dt}{\int_{0,095}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.16)$$

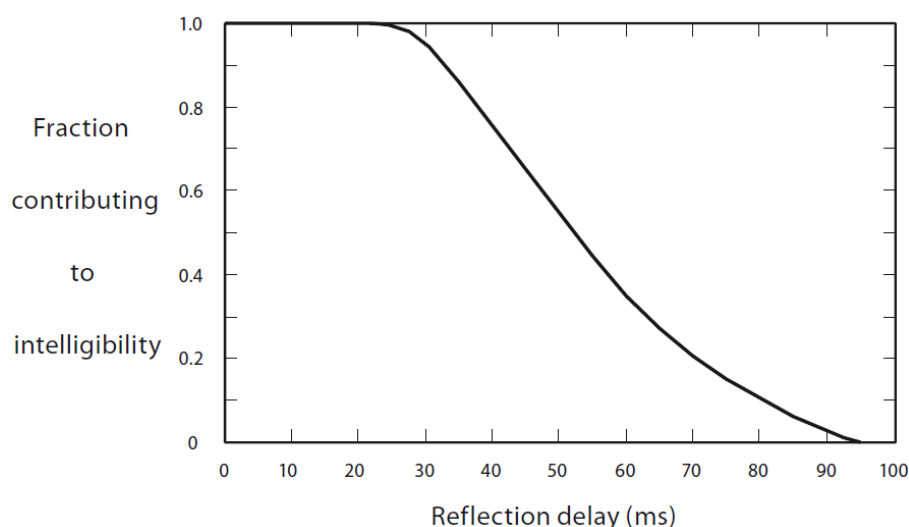


Figura 2.12 – Fração de energia que contribui para a inteligibilidade em função do seu atraso ao som directo (proposta de Lochner e Burger, 1961) [5]

2.6 Arcos côncavos

Quando uma superfície geradora de reflexões tem a forma côncava, pode concentrar a energia reflectida nela numa zona concreta da sala ocupada pelo público ou no palco, criando um efeito de focalização do som. Pode ainda ser causa de ecos e coloração do timbre.

Se um arco côncavo é causa de problemas, depende das posições da fonte e receptor, e do raio do arco.

A Figura 2.13 apresenta um esquema de traçado de raios da dispersão de uma superfície côncava. Esta figura mostra como a superfície apenas é prejudicial para algumas distâncias de receptores, próximas da distância focal do arco. Consequentemente é possível utilizar superfícies curvas salvaguardando que o foco da superfície está distante dos receptores. Por exemplo, um tecto côncavo num auditório não será um problema desde que a superfície curva foque o som bem acima ou bem abaixo da audiência. Se o foco for bem acima da audiência, então a superfície côncava pode paradoxalmente provocar dispersão, mas não de uma forma tão eficaz como muitas outras formas de superfície. Por outro lado, se o foco está abaixo da audiência, apesar de poder não ser apercebida a focalização, a concentração de sons não-laterais de cima pode não ser desejável por outras razões acústicas [6].

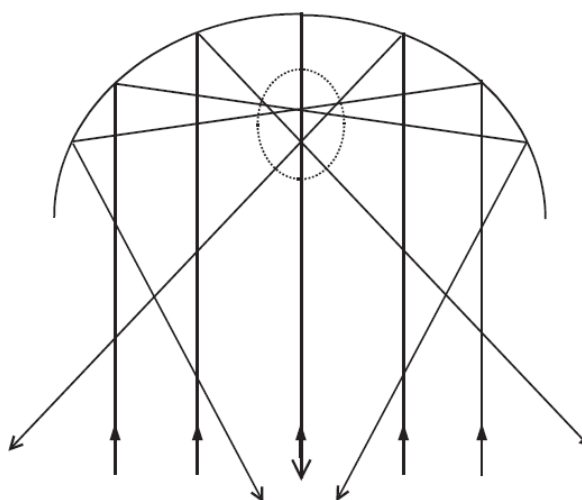


Figura 2.13 – Traçado de raios de dispersão de um arco côncavo. A região arredondada vai receber mais reflexões que outras regiões [6]

3 CASO DE ESTUDO

3.1 Apresentação e Enquadramento histórico

Esta dissertação é acompanhada pelo estudo de um caso: a recentemente reabilitada igreja do Colégio da SS. Trindade, na alta de Coimbra, que passa a desempenhar a função de Grande Auditório da Casa da Jurisprudência, integrada na Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra.

O edifício da Igreja da SS. Trindade e de todos os restantes edifícios do Colégio com o mesmo nome, carrega consigo uma história atribulada. [7] A primeira pedra da empreitada da igreja foi lançada durante o período Filipino, em 1587, desconhecendo-se com rigor a data de conclusão. Apenas se pode estimar que tenha ocorrido durante o segundo quartel do Séc. XVII.

Na esfera das entidades públicas o colégio, talvez pela proximidade com o Paço, rapidamente incorporou a Universidade, existindo cartas de privilégio dirigidas aos seus oficiais como pertencendo ao pessoal universitário, pelo menos desde 1576. Além disto, com as obras na Capela de São Miguel no ano lectivo de 1696-1697, o culto religioso quotidiano da Universidade realizou-se nestes anos na Igreja da SS. Trindade.

O edificado escapou ileso à Reforma Pombalina, bem como à Guerra Peninsular, tendo o Colégio servido de Quartel General das tropas inglesas na região beirã aquando da 2ª Invasão Francesa. Também atravessa ileso a Guerra Civil Portuguesa (1828-1834), que culmina com a vitória dos Liberais e, conseqüentemente, a Extinção das Ordens Religiosas de 1834.

A partir daquela data, o edificado do Colégio passa a propriedade da Fazenda Nacional, tendo sido desocupado. É neste momento que o espaço da igreja perde a sua função original de culto religioso, não a tendo recuperado mais. A parte residencial do Colégio, a metade Nascente, foi vendida em hasta pública em 1849 ao professor do Liceu de Coimbra, o P.º Manuel Simões Dias Cardoso, tendo a metade Poente, incluindo a igreja, sido mantida na Fazenda Nacional.

Esta última metade do colégio, sobretudo a igreja, acolheria ainda outros programas como, a partir de 1884, as aulas de desenho industrial da Escola de Desenho Industrial Brotero e,

desde 1889 após a destruição do Teatro Académico, a Associação Académica de Coimbra, acabando por ser vendida ao proprietário do restante edifício a 12 de Junho de 1895 e ser transformada numa marcenaria, para a qual a igreja servia de armazém e loja de móveis.

Na publicação de Vergílio Correia e António Nogueira Gonçalves “Inventário Artístico de Portugal”, 1947, os autores referem que o estado de conservação do edifício é mau e que a igreja apresenta fendas na abóbada.

Durante a expansão da Cidade Universitária a nascente do Paço das Escolas promovida pelo Estado Novo, e após uma ideia inicial de instalar no Colégio da SS. Trindade uma residência feminina, são realizados dois estudos para a construção da Escola Superior de Farmácia integrando o edificado do Colégio, sendo ambos abandonados por diferentes razões.

O edificado manteve-se assim devoluto, sem que empreitadas de restauro ou reabilitação fossem realizadas e culminando no desabamento do edifício da igreja em 1988. Este acontecimento desencadeou uma série de planos, tendo a Universidade de Coimbra adquirido a ruína com o plano inicial de ali criar o Colégio Europeu. Posteriormente o programa do edifício foi alterado para Tribunal Universitário Judicial Europeu, para integrar a Faculdade de Direito. Em nova redefinição do programa do edifício, este sofreu nova alteração para Casa da Jurisprudência, integrada na Faculdade de Direito, tendo no espaço da igreja uma Sala de Audiências de grandes dimensões.

O projecto de arquitectura da reabilitação do edifício e em particular do espaço da igreja, respeitou a geometria e volumes da construção original. Já após a conclusão do projecto de arquitectura, o espaço da igreja viu a sua função alterada, de sala de audiências para auditório.

Podemos imaginar como seria a igreja do Colégio da SS. Trindade nos dias de hoje se mantivesse a sua função de espaço de culto religioso, perdida em 1834, se olharmos para uma outra igreja construída no mesmo período arquitectónico ao estilo maneirista e igualmente integrada num colégio em Coimbra. Trata-se da igreja do Colégio de Santo Agostinho (ou Colégio da Sapiência), vide Fig. 3.1. As semelhanças de arquitectura são notórias, sendo a diferença mais relevante o tecto da nave, que nesta igreja é em abóbada de arco abatido.



Figura 3.1 – Igreja do Colégio de Santo Agostinho (ou Colégio da Sapiência)

Para um documentário detalhado de toda a história que rodeia o Colégio da SS. Trindade, desde a motivação para a sua criação, empreitada e vida, até aos tempos imediatamente anteriores à reabilitação concluída no ano de 2016, recomenda-se a leitura da dissertação para obtenção de grau de mestre em arquitectura pela Universidade de Coimbra, por João Miguel Figueiredo Silva [7].

3.2 Caracterização geométrica e material

A Igreja da Santíssima Trindade, agora reabilitada como auditório, apresenta uma geometria complexa e será por isso analisada como a composição de 9 volumes: a Nave, a Capela-Mor, o Coro Alto, 3 Capelas Laterais Sul e 3 Capelas Laterais Norte. As Figuras 3.2, 3.3 e 3.4, marcam os limites destes volumes.

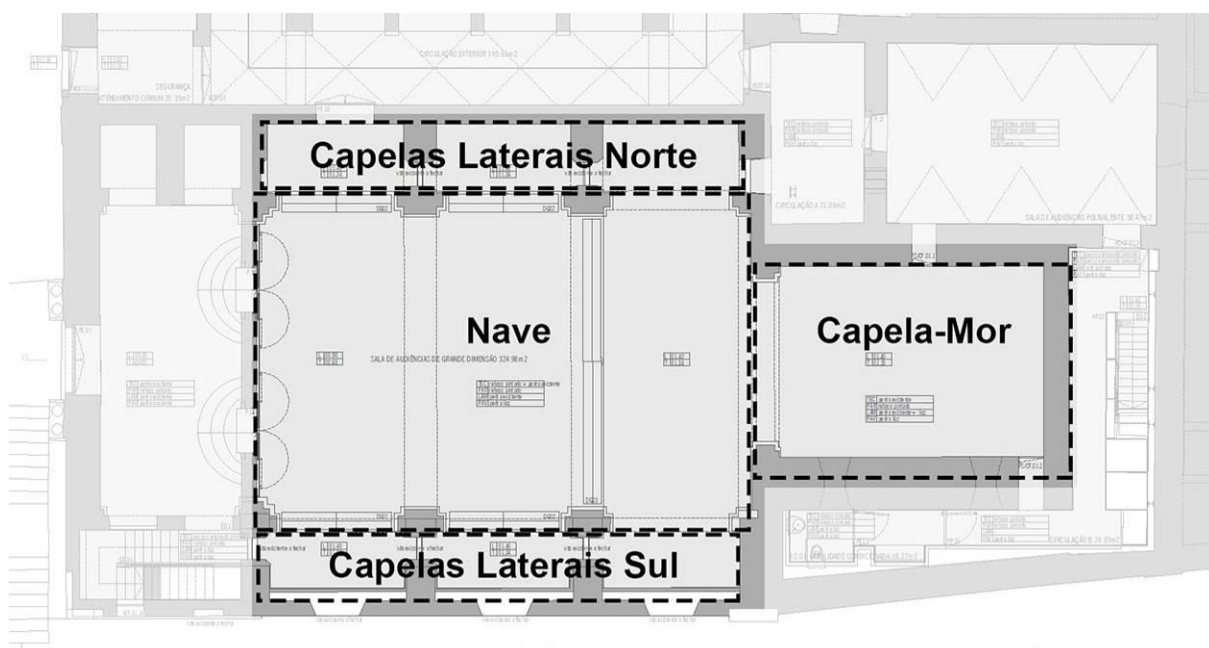


Figura 3.2 – Planta baixa do auditório com marcações dos limites dos volumes.

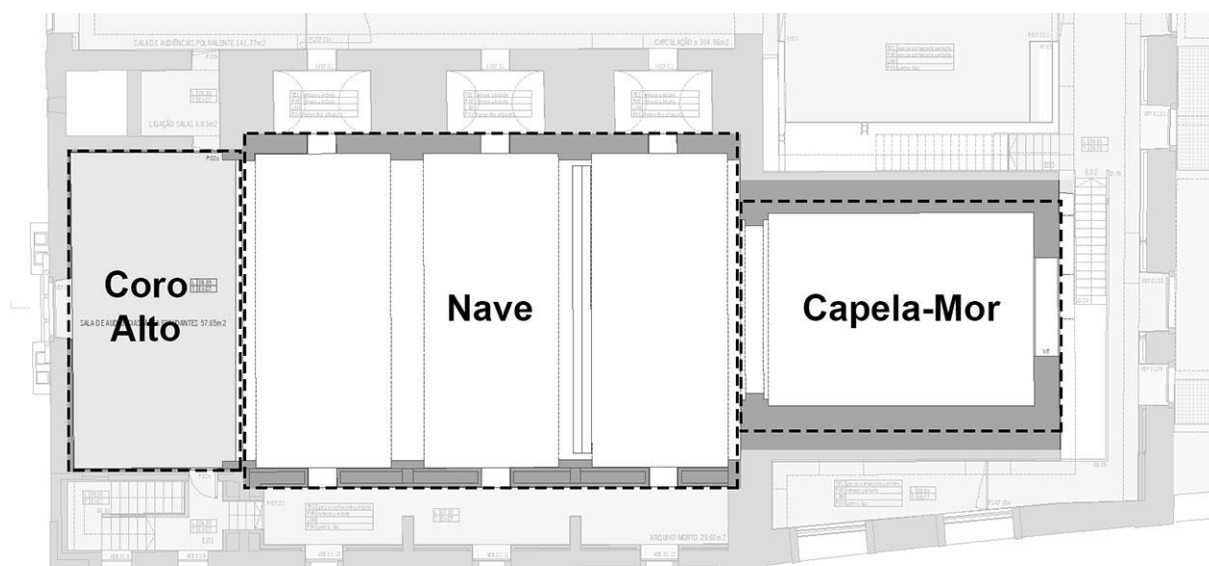


Figura 3.3 – Planta alta do auditório com marcações dos limites dos volumes.

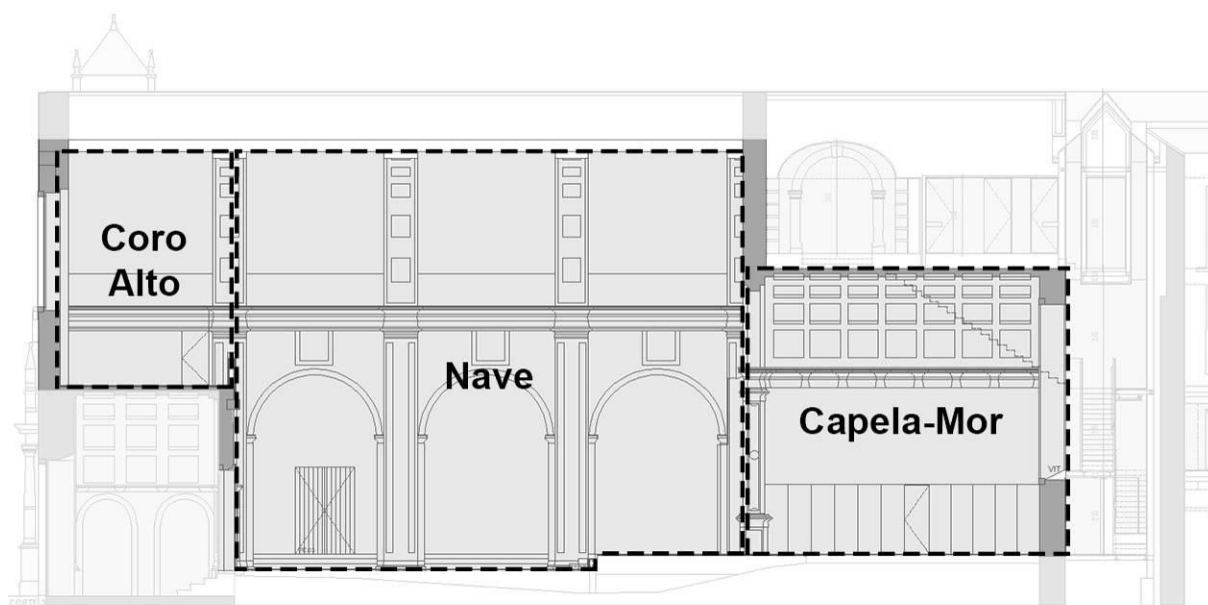


Figura 3.4 – Corte longitudinal do auditório com marcações dos limites dos volumes.

No total, o auditório tem um volume de 3150 m³ e apresenta um plano de simetria coincidente com a secção longitudinal apresentada na Figura 3.4.

O projecto de execução de arquitectura foi disponibilizado pela Universidade de Coimbra para uso nesta dissertação.

Na posse do Projecto de Execução de Arquitectura e em visita efectuada ao agora auditório, foi possível verificar alterações ao projecto, que se assume terem sido decididas em obra. Estas alterações são de cariz funcional, geométrico e também de materiais de revestimento.

Tabela 3.1 – Alterações ao projecto de execução de arquitectura

Alteração	Projecto	Construído
Alteração da função principal do espaço.	Grande sala de audiências.	Grande auditório.
Criação de nicho na parede Este da Capela-Mor.	O vão na parede Este está fechado.	O nicho foi criado, com criação de nova parede afastada do vão.
Cota do pavimento da Capela-Mor.	Cota igual à cota da secção Este da Nave.	Cota 10 cm acima da secção Este da Nave, com degrau.

Alteração	Projecto	Construído
Alteração da função principal do espaço.	Grande sala de audiências.	Grande auditório.
Criação de nicho na parede Este da Capela-Mor.	O vão na parede Este está fechado.	O nicho foi criado, com criação de nova parede afastada do vão.
Cota do pavimento do Coro Alto.	Cota igual às entradas.	Cota 34 cm acima das entradas para o Coro Alto, com 2 degraus. A guarda para a Nave, acompanhou este alteamento.
Portas em todas as paredes Norte das Capelas Laterais Norte.	Porta de entrada na Capela Lateral Norte, Oeste.	Uma porta de entrada em cada Capela Lateral Norte.
Material de revestimento do tecto da Nave e Coro Alto, em abóbada.	Revestimento em reboco comum.	Revestimento em sistema de tratamento acústico de lâ mineral e acabamento em reboco projectado.
Material de revestimento da parede Oeste do Coro Alto.	Revestimento em reboco comum.	Revestimento em sistema de tratamento acústico de lâ mineral e acabamento em reboco projectado.
Material de revestimento da parede sob o arco, que separa a Nave do Nártex	Revestimento em reboco comum.	Revestimento em sistema de painéis de régua de madeira pintada, com frestas aparentes, confinando com caixa-de-ar preenchida com material absorvente sonoro

3.2.1 Nave

A Nave, com 170 m² de piso, é o maior e o principal volume da igreja agora auditório, que alberga simultaneamente o palco com mesa de oradores e palanque, e a audiência com 108 cadeiras. Apresenta o tecto em abóbada de arco perfeito suportado por 3 arcos estruturais em pedra e pela parede que integra o portal da Capela-Mor. As secções Oeste e Central da Nave, onde se situa a audiência do auditório, têm o pavimento a cota 0,50 m abaixo da cota da secção Este da Nave e das Capelas Laterais Norte e Sul. Esta diferença de cotas é vencida por três degraus. O pé direito máximo é de 13,76 m na secção Oeste e Central e de 13,26 m na secção Este. O pavimento foi materializado em pedra lioz.

Na reabilitação realizada, o tecto em abóbada foi revestido com um sistema de tratamento acústico para absorção sonora, com acabamento em reboco especializado. Na parede que separa a Nave do Nártex (vestíbulo de entrada sob o Coro Alto), foi instalado um sistema de

revestimento de painéis de régua de madeira pintada, com frestas aparentes, confinando com caixa-de-ar preenchida com material absorvente sonoro.



Figura 3.5 – Perspectiva alta da Nave, da Capela-Mor e Nicho.



Figura 3.6 – Perspectiva da Nave e do Coro Alto.

3.2.2 Capela-Mor

A Capela-Mor confina com a Nave, a Este. Tem 62 m² de piso, pé direito máximo de 9,27 m e tecto em abóbada de arco perfeito em pedra, decorado com baixos-relevos. Na parede Este encontra-se um nicho de grandes dimensões enquadrado por uma moldura simples em madeira pintada e com um elemento decorativo em madeira centrado na parede Este, de tema religioso. Na reabilitação, o pavimento foi materializado em pedra lioz, estendendo-se para as paredes através de um lambrim com 2,17 m de altura, no mesmo material. As paredes Norte e Sul, entre o lambrim e o arranque da abóbada, estão revestidas a azulejos, excepto numa pequena faixa onde existira uma pintura decorativa, possivelmente executada em fresco. Na parede Sul existem ainda dois pequenos nichos que correspondem a dois vãos que foram encerrados.



Figura 3.7 – Panorâmica dentro da Capela-Mor, com Nicho e tecto em abóbada com baixos-relevos.

3.2.3 Coro Alto

O Coro Alto confina com a Nave, a Oeste. Tem 57 m^2 de piso, elevado $6,29 \text{ m}$ relativamente ao piso de cota mais baixa da nave, onde se situa a audiência. Fica ainda elevado $0,34 \text{ m}$ relativamente às entradas para este volume, sendo o desnível vencido com dois degraus. O tecto em abóbada é em continuação do tecto da nave e está suportado a Oeste pela parede de fachada. Esta parede apresenta um janelão com $2,0 \times 3,55 \text{ m}^2$ onde foi instalado um estore à face do paramento interior da parede. Na reabilitação, o pavimento foi materializado em pedra lioz, estendendo-se para a parede Oeste através de um lambrim com $1,58 \text{ m}$ de altura, no mesmo material. No revestimento desta parede acima do lambrim, foi executado o mesmo

sistema de tratamento acústico aplicado no tecto em abóbada, acima descrito, com acabamento em reboco especializado. As paredes Norte e Sul são revestidas a reboco comum e têm um vão cada uma, encerrados por portas de madeira. O Coro Alto tem instaladas quatro mesas com 4 cadeiras cada. Tem ainda um projector sobre um móvel metálico.



Figura 3.8 – Panorâmica do Coro Alto.

3.2.4 Capelas Laterais Sul

As três Capelas Laterais Sul confinam com a Nave, a Sul. Têm 13 m^2 de piso cada uma e pé direito máximo de 6,12 m. O tecto é em abóbada de arco perfeito em pedra decorada com baixos-relevos. A largura de cada capela é de 4,54 m com entradas em arco e profundidade de 2,79 m. Os pavimentos são em pedra lioz. As paredes Sul são revestidas a reboco comum, e têm um vão envidraçado cada uma, onde foram instalados estores à face do paramento interior das paredes. As capelas têm comunicação entre si por um pequeno vão de $0,76 \times 1,34 \text{ m}^2$;



Figura 3.9 – Panorâmica das Capelas Laterais Sul.

3.2.5 Capelas Laterais Norte

As três Capelas Laterais Norte confinam com a Nave, a Norte. São em tudo semelhantes às Capelas Laterais Sul, excepto nos vãos. As paredes Norte são cegas, tendo vãos encerrados por portas de madeira.



Figura 3.10 – Panorâmica das Capelas Laterais Norte.

3.3 Levantamento de materiais de revestimento

Na Tabela 3.2 é apresentado o levantamento dos materiais de revestimento existentes após as obras de reabilitação, e sua distribuição pelos diferentes volumes do auditório.

Tabela 3.2 – Levantamento de materiais por local

	Capela-Mor e Nicho	Nave	Coro Alto	Capelas Laterais Sul	Capelas Laterais Norte
Pedra original	X	X	X	X	X
Pedra original com baixos-relevos	X	X		X	X
Pedra nova	X	X	X	X	X

	Capela-Mor e Nicho	Nave	Coro Alto	Capelas Laterais Sul	Capelas Laterais Norte
Reboco comum	X	X	X	X	X
Sistema de lã mineral e acabamento em reboco projectado.		X	X		
Sistema de painéis de régua de madeira pintada, com frestas aparentes, confinando com caixa-de-ar preenchida com material absorvente sonoro.		X			
Azulejo	X				
Vidro				X	
Estores				X	
Madeira	X	X	X		X
Madeira – mobiliário		X		X	
Cadeiras vazias - audiência		X	X		
Metal - projector e armário			X		

3.4 Desafios

A decisão de reconstrução e/ou reabilitação profunda de um edifício histórico está intrinsecamente ligada à afectação do mesmo a uma função. Poderá ser a continuidade da função passada ou uma nova função.

O edificado do Colégio da SS. Trindade é bom exemplo disto, pois só quando lhe foi encontrada uma função adequada ao espaço e à envolvente, foi possível reunir o orçamento necessário para a empreitada. Porém, ao edifício da igreja foi-lhe atribuído uma nova funcionalidade de grande auditório, que traz consigo desafios importantes no âmbito da acústica.

3.4.1 Alteração de funções

A alteração da função da igreja da SS. Trindade, de espaço de culto religioso católico, para auditório, não permite a manutenção do património acústico associado ao espaço de culto cristão católico, com elevado tempo de reverberação. Uma igreja católica deverá ter um tempo de reverberação elevado para que as palavras, em discurso pausado, cheguem a toda a sala sem grande esforço do orador [2]. Em oposição, um auditório terá como objectivo

acústico principal, a inteligibilidade da palavra num discurso em ritmo normal, precisando quase sempre de um tempo de reverberação baixo.

3.4.2 Pé-direito elevado

Com um pé-direito que atinge os 13,76m no seu ponto maior, não é possível considerar o tecto como origem de primeiras reflexões para alimentar os lugares recuados da plateia. Possivelmente poderá ser considerado para o volume do coro alto.

3.4.3 Tectos em abóbada

Todos os volumes do auditório têm tectos em abóbada de arco perfeito, incluindo a nave e coro alto, onde se localiza a audiência. As abóbadas formam superfícies côncavas que podem levar a fenómenos de má qualidade acústica como a focalização do som e ecos flutuantes. No volume da nave e devido ao elevado pé-direito, este fenómeno poderá não ser relevante ao nível da plateia. Porém, no volume do coro este efeito poderá ser relevante.

Por outro lado, a obra de reabilitação realizada incluiu o revestimento da abóbada da nave e do coro alto com um material absorvente sonoro. Esta acção não reduz o efeito de focalização do som, mas reduz a quantidade de energia sonora total reflectida, fazendo com que seja menos provável que o eventual efeito de focalização seja causa de perturbação.

3.4.4 Rácio de volume por número de lugares

O rácio do volume da sala por número de lugares da audiência, é uma medida indicativa mas prática, para obter a volumetria aproximada necessária para a sala quando estamos a projectar para condições acústicas ideais.

Para o projecto de um teatro, Michael Barron [5] indica-nos um rácio de 4 m³/lugar, enquanto Antoni Carrión Isbert [1] indica uma gama de valores do rácio, entre 4 e 6 m³/lugar.

A análise de um grande número de salas evidencia a consistência deste rácio, em função do tipo de utilização do espaço e mostra relação com o tempo de reverberação médio óptimo. Ainda assim, este rácio apresenta elevada variabilidade nos valores, e nem sempre as salas que são categorizadas como as melhores numa avaliação subjectiva, correspondem às que se enquadram na gama de valores indicados para este rácio. Deve ser por isso utilizado como um valor indicativo e não prescritivo.

O caso de estudo, inicialmente construído com a funcionalidade de igreja católica é, como seria de esperar, um espaço com tectos elevados, elevada volumetria e muito elevado rácio de volume por número de lugares. Para o número de cadeiras existentes no local à data de medição acústica: 106, este rácio resulta em 29 m³/lugar.

3.4.5 Materiais com baixo coeficiente de absorção sonora

Durante a reabilitação do espaço da igreja, foram introduzidos dois materiais com elevada absorção sonora. Ainda assim, a maioria das superfícies do auditório são constituídas por materiais rígidos e reflectores, como pedra, reboco comum e azulejos.

3.4.6 Distância à fonte

Os lugares mais recuados da plateia e os lugares no coro, que podem atingir distâncias de 20m à fonte, terão acesso limitado ao campo directo, sendo por isso necessário encontrar um balanço naquele espaço, para optimizar a inteligibilidade da palavra.

3.4.7 Mobiliário e decoração

A reabilitação da igreja trouxe um espaço desnudado em comparação ao que se pode imaginar ter sido a igreja da SS. Trindade após a sua conclusão em meados do séc. XVII, com a capela-mor e as capelas laterais com altares de madeira trabalhada, elementos escultóricos e decorações em madeira e tecido. Todos estes elementos conferiam absorção e difusão do som, que agora se perderam.

3.5 Objectivos acústicos

Neste capítulo definem-se os objectivos para os parâmetros acústicos desejáveis para o caso de estudo, na sua nova função de auditório.

3.5.1 Tempo de reverberação (TR)

Dentro do domínio das salas dedicadas à palavra, autores como Higini-Arau Puchades e Marshall Long consideram semelhantes características acústicas de tempo de reverberação para teatros e auditórios. Já no caso de salas de conferência por exemplo, estas deverão ter menor tempo de reverberação que as anteriores.

O tempo de reverberação óptimo para cada sala em função do tipo de utilização e do volume, é-nos indicado na maioria da bibliografia como um ábaco com valores máximos e mínimos recomendados.

Para salas de teatro, Antoni Carrión Isbert [1] recomenda a gama de valores de tempo de reverberação do ábaco da Figura 3.11. De notar que este autor optou por apresentar valores para salas ocupadas.

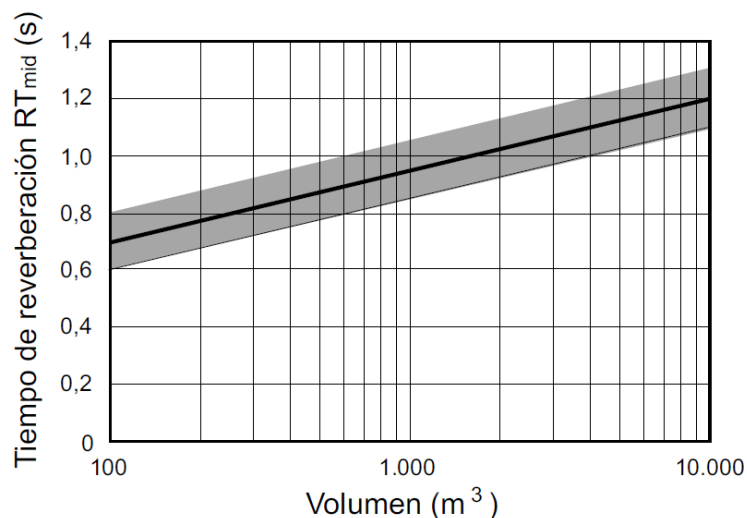


Figura 3.11 – Margem de valores recomendados de TR_{mid} para sala de teatro ocupada, em função do volume, segundo Antoni Carrión Isbert [1]

$$\text{com, } TR_{mid} = \frac{TR(500 \text{ Hz}) + TR(1 \text{ kHz})}{2} \quad (3.1)$$

Para o caso de estudo, com volume de 3150 m^3 , $TR_{mid} = 1,08 \pm 0,10 \text{ s}$.

Reforça-se aqui que o autor indica este valor para a sala ocupada.

Marshall Long [3] recomenda a gama de valores apresentada no ábaco da Figura 3.12, incluindo para a função de salas de teatro e auditórios: “Legitimate Theatres and Auditoriums”.

Para o caso de estudo, com volume de 3150 m^3 , a gama de valores recomendada para TR_{mid} situa-se entre 1,12 s e 1,18 s.

O mesmo autor refere ainda que em salas para a função de palavra, o comportamento do tempo de reverberação em função da frequência, será desejavelmente linear.

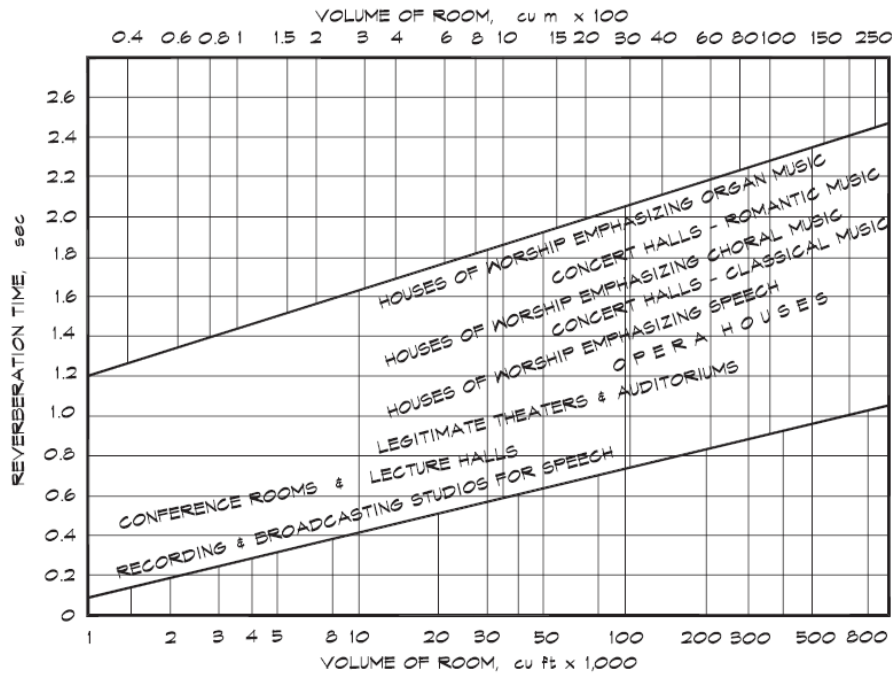


Figura 3.12 – Margem de valores recomendados de TR_{mid} para sala de teatro vazia, em função do volume, segundo Marshall Long [3]

Higini Arau-Puchades [8] apresenta a sua recomendação das curvas de tempo de reverberação óptimo sob a forma de funções cuja variável é o volume da sala. No caso de salas de teatro, vazias, as fórmulas são as seguintes:

$$TR_{mid \text{ ótimo Máx}} = 0,368 \times V^{0,1505} \quad (3.2)$$

$$TR_{mid \text{ ótimo Mín}} = 0,264 \times V^{0,1394} \quad (3.3)$$

$$\text{com, } TR_{mid} = \frac{TR(500 \text{ Hz}) + TR(1 \text{ kHz})}{2} \quad (3.4)$$

Para o caso de estudo, a gama de valores recomendada para $TR_{mid \text{ ótimo}}$ situa-se entre 0,81 s e 1,24 s.

3.5.2 Early Decay Time (EDT)

No sentido de promover uma boa definição e clareza da palavra, é desejável que o parâmetro EDT seja baixo. O valor recomendado para teatros e que consideraremos também

para o auditório caso de estudo, é dado como uma percentagem do tempo de reverberação ideal. Neste caso, entre 60% e 75% do TR [9].

$$0,60 \times TR \leq EDT \leq 0,75 \times TR \quad (3.5)$$

3.5.3 Definição da palavra (D_{50})

O parâmetro de definição da palavra D_{50} , pretende-se o maior possível em todas as gamas de frequências. Antoni Carrión Isbert [1] indica que em cada ponto da sala ocupada e em cada banda de frequências de 125 Hz a 4 kHz, D_{50} deve ser superior a 50%.

$$D_{50} > 0,50 \quad (3.6)$$

3.5.4 Inteligibilidade da palavra (STI / RASTI)

Para os parâmetros de inteligibilidade STI / RASTI, Antoni Carrión Isbert [1] recomenda que em todos os pontos da audiência os valores sejam maiores ou iguais a 65%, com a sala ocupada.

$$STI / RASTI \geq 0,65 \quad (3.7)$$

4 CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DO CASO DE ESTUDO

4.1 Medições objectivas da acústica do caso de estudo

No dia 27/12/2017 durante o período da tarde, foram realizadas medições acústicas no auditório, de acordo com a norma ISO 3382-1, para se proceder à sua caracterização.

As medições foram realizadas com o auditório desocupado.

4.1.1 Equipamento

Para efectuar as medições acústicas, utilizaram-se os seguintes equipamentos:

- analisador portátil, de dois canais, modelo Symphonie, da marca 01dB, ligado a PC portátil;
- microfone modelo 40AF, com pré-amplificador do tipo 26AK, da marca “GRAS – Sound & Vibration” e calibrador de microfone, modelo CAL da marca 01dB;
- fonte sonora omnidirecional normalizada de sons aéreos (dodecaédrica), modelo DO 12, da marca 01dB;
- amplificador, modelo M700, com 600W de potência da marca 01dB;
- gerador de ruído modelo RG-10 da marca 01dB.

O ruído de teste utilizado nestes ensaios foi gerado através da técnica de correlação “sequências de comprimento máximo” (maximum length sequences – MLS).

4.1.2 Características do ar (meio de propagação)

Foram medidos os valores de Temperatura, 12,8 °C e de Humidade Relativa, 64%, recolhidos durante as medições acústicas efectuadas.

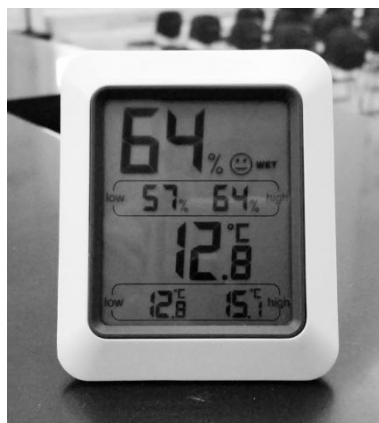


Figura 4.1 – Medição de Temperatura e Humidade Relativa

4.1.3 Posições de Fontes e de Receptores

A escolha das posições das fontes teve em consideração 2 posições com potencialmente diferentes resultados, para obter uma média espacial mais representativa da sala. As posições dos receptores são 7 e são representativas dos lugares da audiência e consideram o plano de simetria do auditório.

Foram tomadas 3 leituras em cada par Fonte-Receptor, com exceção única para o par Fonte 2 (F2) – Receptor 2 (R2), onde só foram tomados 2 valores.

A Figura 4.2 apresenta a localização das 2 fontes e dos 7 receptores.

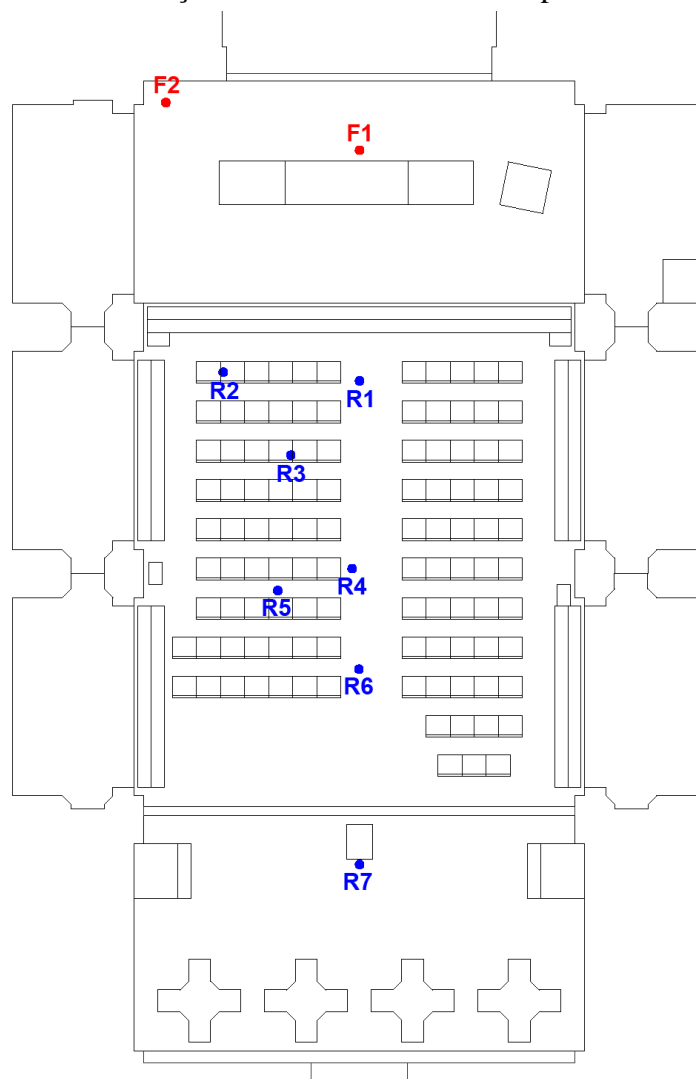


Figura 4.2 – Planta do auditório com marcação das posições das 2 fontes e dos 7 receptores adoptados na medição acústica



Figura 4.3 – Perspectiva da Nave e Coro Alto, com Fonte na posição F1 e Receptor na posição R7 (Coro Alto)

4.2 Resultados das medições

4.2.1 Resultados do parâmetro T_{30}

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os valores médios das leituras de T_{30} em cada par Fonte-Receptor.

Tabela 4.1 – Valores médios de T_{30} por receptor, para a fonte F1

Fonte F1							
F	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
(Hz)	(s)	(s)	(s)	(s)	(s)	(s)	(s)
125	3,74	2,91	3,60	4,08	4,55	4,01	4,22
250	3,41	3,23	3,68	3,01	3,25	3,39	3,40
500	3,26	3,06	3,14	3,12	3,22	3,20	3,10
1000	2,68	2,73	2,75	2,75	2,65	2,86	2,75
2000	2,47	2,44	2,43	2,44	2,53	2,51	2,52
4000	2,05	2,04	2,11	2,09	2,07	2,07	2,14

Tabela 4.2 – Valores médios de T_{30} por receptor, para a fonte F2

Fonte F2							
f	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
(Hz)	(s)	(s)	(s)	(s)	(s)	(s)	(s)
125	4,37	4,23	4,31	3,72	3,89	4,58	4,86
250	3,30	3,42	3,28	3,20	3,21	3,38	3,62
500	3,13	3,19	2,97	3,06	3,01	3,28	3,03
1000	2,59	2,67	2,62	2,63	2,64	2,68	2,89
2000	2,51	2,45	2,41	2,42	2,37	2,47	2,43
4000	2,03	2,03	2,07	2,05	2,03	2,05	2,04

A Tabela 4.3 seguinte, apresenta os valores da média espacial do parâmetro T_{30} , o desvio padrão, e também a repetibilidade $\sigma(T_{30})$. Estes valores foram calculados de acordo com os capítulos 8 e 7.2 da norma ISO 3382-1.

Tabela 4.3 – Média espacial de T_{30} , desvio padrão e repetibilidade $\sigma(T_{30})$

f	T_{30} Média Espacial	Desvio Padrão	$\sigma(T_{30})$ Repetibilidade
(Hz)	(s)	(s)	(s)
125	4,08	0,474	0,034
250	3,34	0,166	0,022

f	T ₃₀ Média Espacial	Desvio Padrão	$\sigma(T_{30})$ Repetibilidade
(Hz)	(s)	(s)	(s)
500	3,13	0,091	0,015
1000	2,71	0,085	0,010
2000	2,46	0,045	0,007
4000	2,06	0,031	0,004

4.2.2 Resultados do parâmetro EDT

A Tabela 4.4 apresenta os valores da média espacial dos valores medidos do parâmetro EDT.

Tabela 4.4 – Média espacial dos valores medidos de EDT

f	EDT Média Espacial
(Hz)	(s)
125	3,84
250	3,30
500	3,07
1000	2,60
2000	2,38
4000	1,92

4.2.3 Zonamento da audiência do auditório para análise de D₅₀, RASTI e STI

Os parâmetros acústicos D₅₀, RASTI e STI, dependem fortemente da relação entre o campo directo e campo reverberado e portanto da distância dos receptores às fontes. Assim, é importante uma análise daqueles parâmetros por zonas da audiência.

Ao criar zonas de audiência no caso de estudo, optou-se por dividir em apenas 3 zonas, uma vez que a área de pavimento do auditório é pequena. As zonas A e B na Nave e a zona C no Coro Alto.

Tabela 4.5 – Zonamento da audiência

Zona	Abrangência
A	Da 1ª fila à 5ª fila da Nave.
B	Da 6ª fila à 11ª fila da Nave.
C	Coro Alto.

A Figura 4.4 mostra a marcação das zonas de audiência.

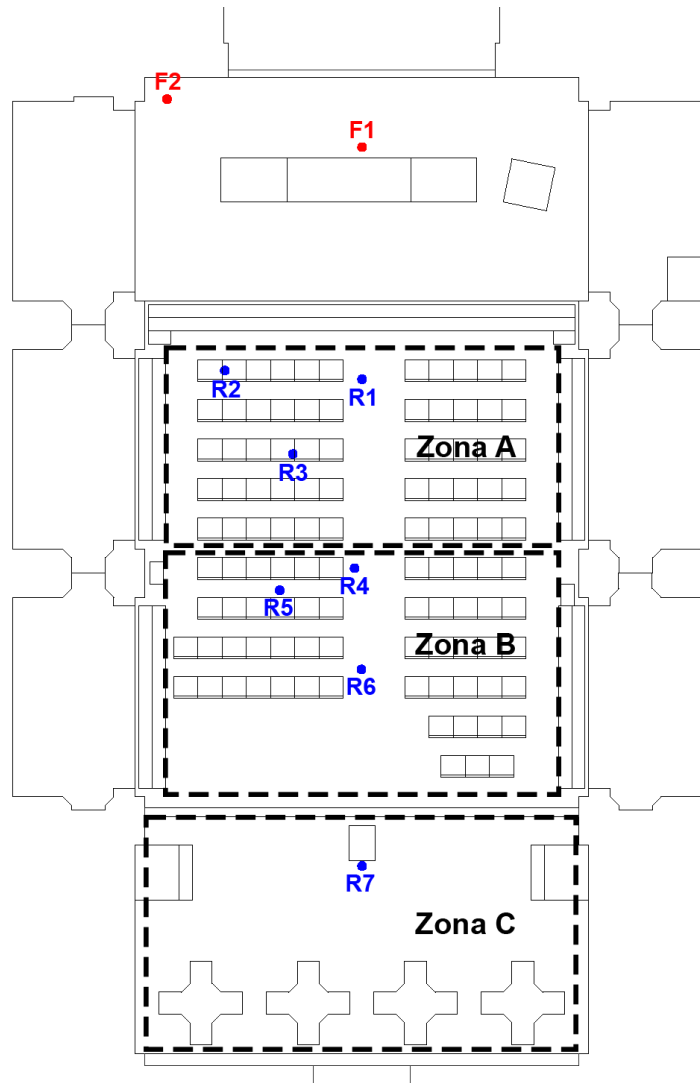


Figura 4.4 – Planta do auditório com marcação do zonamento da audiência

4.2.4 Resultados de D_{50} , C_{80} , RASTI e STI

De acordo com o zonamento da audiência do capítulo anterior, as tabelas seguintes 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam os respectivos valores das médias espaciais por zona de audiência, dos parâmetros D_{50} , C_{80} , RASTI e STI. É ainda calculado o parâmetro D_{50} (500Hz, 2kHz), que é a média dos valores de D_{50} para as bandas de oitava de 500 Hz e 2000 Hz. Estas são as componentes principais da voz humana.

Tabela 4.6 – Valores médios de D_{50} , C_{80} , RASTI e STI na zona A

Zona A					
f	D_{50}	D_{50} (500Hz, 2kHz)	C_{80}	RASTI	STI
(Hz)	(%)	(%)	(dB)	(%)	(%)
125	8,7	24,7	-5,6	43,9	43,2
250	23,9		-3,0		
500	19,7		-3,9		
1000	25,4		-2,2		
2000	29,7		-1,3		
4000	34,0		-0,2		

Tabela 4.7 – Valores médios de D_{50} , C_{80} , RASTI e STI na zona B

Zona B					
f	D_{50}	D_{50} (500Hz, 2kHz)	C_{80}	RASTI	STI
(Hz)	(%)	(%)	(dB)	(%)	(%)
125	10,6	13,9	-6,8	41,2	39,2
250	14,0		-5,1		
500	10,8		-6,1		
1000	17,9		-3,9		
2000	16,9		-3,6		
4000	22,0		-2,2		

Tabela 4.8 – Valores de D_{50} , C_{80} , RASTI e STI na zona C

Zona C					
f	D_{50}	D_{50} (500Hz, 2kHz)	C_{80}	RASTI	STI
(Hz)	(%)	(%)	(dB)	(%)	(%)
125	6,7	21,4	-7,5	44,5	42,0
250	11,8		-5,9		
500	15,2		-4,4		
1000	19,0		-3,6		
2000	27,5		-2,0		
4000	35,5		-0,5		

Importa ainda referir que foram realizadas medições usando como fonte 1 dos 4 altifalantes instaladas no auditório, o altifalante mais próximo do Receptor 2. Este ponto foi excluído da medição devido à proximidade.

Como seria de esperar, o parâmetro D_{50} (500Hz, 2kHz) aumentou muito, de 20% para 59%. Isto deve-se essencialmente a dois factores: a proximidade do altifalante aos receptores e a direccionalidade do altifalante, que fazem com que muitos receptores estejam dentro do campo directo, enquanto na fonte omnidireccional uma fracção maioritária do som irradiado, só chega aos receptores como reflexões tardias. É também por este último motivo que os valores de RASTI/STI aumentam 16 e 19 pontos percentuais respectivamente.

Apenas se ressalva que por se usar um altifalante apenas, em vez dos 4, podem ter-se obtido valores um pouco optimistas, pois os sons dos 4 altifalantes a funcionar em simultâneo chegarão desfasados aos receptores e este efeito pode piorar a inteligibilidade.

4.3 Medições objectivas da acústica da Sala dos Capelos

Com o pedido realizado e a autorização da Universidade de Coimbra para a realização das medições acústicas no auditório que é o caso de estudo, foi também pedido e autorizado o acesso à Sala dos Capelos, ou Sala dos Grandes Actos da Universidade de Coimbra, para a realização de medições acústicas.

Esta sala é um espaço de riquíssimo valor histórico. É a principal sala da Universidade e local onde se realizam as principais cerimónias académicas. É também o local por excelência da realização das provas doutorais dos doutorandos da Universidade de Coimbra, e é mais conhecida como Sala dos Capelos, nome dado à pequena capa usada pelos Doutores da Universidade em ocasiões solenes. Foi a primeira Sala do Trono de Portugal. Teve lugar aqui, entre Março e Abril de 1385, a reunião das Cortes que determinaram a aclamação de D. João, o Mestre de Avis, Rei de Portugal [10].

As medições acústicas foram realizadas no dia 27/12/2017, no período da manhã.

Os resultados das medições são apresentados no Anexo 1 desta dissertação.

5 MODELO NUMÉRICO

5.1 Escolha da técnica de modelação computacional

A propagação do som directo entre uma fonte e um receptor pode ser matematicamente descrita pela equação de Helmholtz (equação de onda). No entanto, quando existem reflexões do som o problema não pode, em geral, ser resolvido analiticamente. Por esse motivo, apenas se pode obter uma solução aproximada para o problema, com base em diferentes métodos. De entre os métodos utilizados, podem referir-se os que se baseiam na teoria ondulatória, através da resolução da equação de Helmholtz de forma aproximada para cada caso específico, os métodos baseados na propagação de raios e os métodos estatísticos [2].

Para análise, simulação e previsão de parâmetros acústicos em espaços fechados como o do caso de estudo, a técnica que habitualmente se apresenta como mais eficiente é o método geométrico de traçado de raios.

Esta técnica analisa o modelo por bandas de frequências, habitualmente em oitavas. É amplamente aceite nas gamas das médias e altas frequências, dominadas pela densa sobreposição de modos, com propriedades estatísticas, a que se chama campo difuso. Diz-se que um campo é difuso, quando tem igual densidade de energia em todos os pontos do compartimento [3]. Isto implica igual probabilidade de o som chegar de qualquer direcção.

Porém, ao analisarmos a gama das baixas frequências onde os modos não se sobrepõem ou têm poucas sobreposições, aquela técnica tem a sua precisão comprometida e deve considerar-se recorrer a outras técnicas, para análise dos modos normais.

A região de intersecção entre as gamas médias-altas frequências e baixas frequências, não ocorre de forma abrupta e a definição de uma frequência limite não é óbvia. Manfred Schroeder estudou esta região de transição e após anos de experiências entendeu limitar a região de intersecção, onde havia sobreposição tripla de modos [11]. Este pressuposto conduziu à famosa fórmula da frequência de Schroeder:

$$f_c = 2000 \times \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (5.1)$$

T_{60} – Tempo de Reverberação (s)
 V – Volume (m^3)

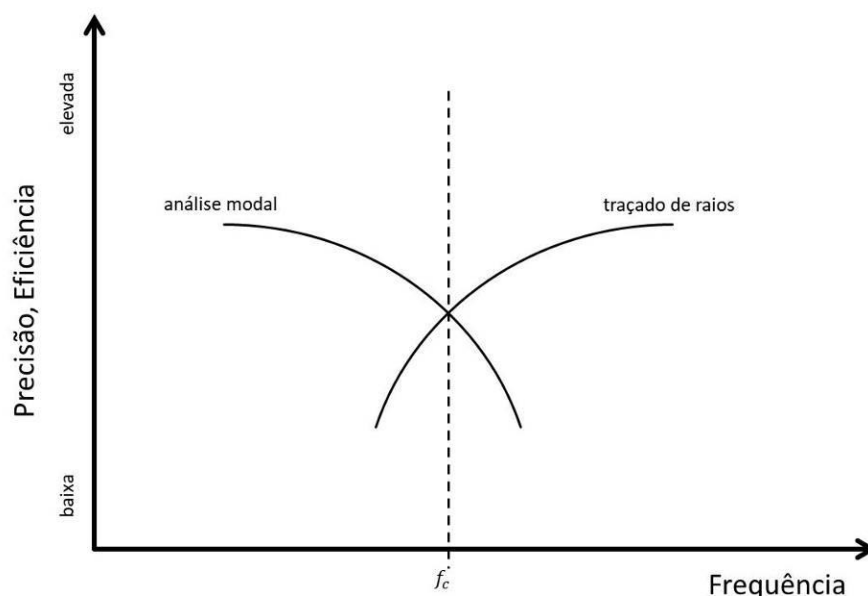


Figura 5.1 – Esquema de princípio evidenciando a Precisão e Eficiência dos métodos numéricos em função da frequência, segundo John Storyk [12]

No caso de estudo, a frequência de Schroeder situa-se abaixo das frequências analisadas, essencialmente devido ao volume total do auditório e devido aos materiais de tratamento acústico já instalados que baixam o tempo de reverberação.

Das medições acústicas realizadas, resultou o parâmetro de medição de tempo de reverberação T_{30} . Para o cálculo da frequência de Schroeder (f_c) utiliza-se $T_{30, \text{mid}}$ que representa a média de T_{30} nas frequências de 500 Hz e 1000 Hz.

$$f_c = 2000 \times \sqrt{\frac{(3,13+2,71)/2}{3150}} = 61 \text{ Hz} \quad (5.2)$$

Ter $f_c = 61 \text{ Hz}$, significa que o método de traçado de raios pode ser usado com confiança em todo o espectro de frequências analisadas neste estudo (88 Hz a 5657 Hz).

5.2 Programa de cálculo a utilizar

Há vários programas de cálculo de simulação acústica no mercado, que utilizam o método geométrico de traçado de raios. O programa utilizado neste estudo foi o CATT (Computer Aided Theatre Technique) v9.1b de Gotemburgo. Desde 1988 que este programa foi desenvolvido especificamente para a simulação e previsão de parâmetros acústicos de espaços fechados, e ainda para auralização.

A licença usada é uma demonstração para fins académicos e tem limitações técnicas, sendo a mais significativa para este estudo a limitação na simulação a 5000 raios.

5.3 Apresentação do modelo numérico

O modelo numérico foi criado numa primeira fase, para se proceder à calibração do mesmo. Assim, procurou-se replicar as condições encontradas durante o período das medições acústicas realizadas em termos de geometria do espaço e materiais de revestimento, em termos das posições de fontes e receptores e ainda das características do ar.

5.3.1 Dados de entrada da geometria

O modelo numérico foi criado considerando a organização do espaço nos 9 volumes descritos no Capítulo 3.2. Para efeitos de organização na entrada de dados de geometria no programa, cada volume recebeu um trígama como código. Os dados de mobiliário são introduzidos separadamente e recebem um trígama próprio. Também foi reservado um código para elementos de tratamento acústico.

A cada volume foi ainda reservada uma gama de números para identificação de cantos (Corners) e planos (Planes) em ficheiro de dados geométricos.

A Tabela 5.1 apresenta os códigos, números para identificação de cantos e planos, e ainda o nome dos ficheiros com os dados de entrada da geometria do modelo.

Tabela 5.1 – Codificação dos volumes da igreja, números para identificação de cantos e de planos, e nomes de ficheiros atribuídos

Volumes	Trígama	Cantos e Planos	Ficheiro
Nicho	NIC	10xx a 13xx	NIC.GEO
Capela-Mor	ALM	14xx a 19xx	ALM.GEO
Nave	NVE	2xxx	NVE.GEO
Coro Alto	CRO	3xxx	CRO.GEO
Capela Lateral Sul – Este	CS1	40xx a 42xx	CS1.GEO
Capela Lateral Sul – Central	CS2	43xx a 45xx	CS2.GEO
Capela Lateral Sul – Oeste	CS3	46xx a 48xx	CS3.GEO
Capela Lateral Norte – Este	CN1	50xx a 52xx	CN1.GEO
Capela Lateral Norte – Central	CN2	53xx a 55xx	CN2.GEO
Capela Lateral Norte – Oeste	CN3	56xx a 58xx	CN3.GEO
Mobiliário	MOB	6xxx	MOB.GEO
Elementos para Tratamento Acústico	ECA	7xxx	ECA.GEO

O processo de criação dos dados geométricos do auditório para o modelo, não foi directo a partir dos desenhos do projecto de execução de arquitectura. Três factores tiveram de ser considerados e que levaram à necessidade de criar desenhos com a projecção ortogonal de cada um dos 9 volumes que compõem o espaço, antes da introdução de dados. São apresentados de seguida, por ordem decrescente de importância.

O primeiro factor é o processo de simplificação da geometria do espaço. Um modelo numérico não tem, nem pretende ter, uma representação exacta da geometria do espaço fechado. Desde logo por razões de tempo e de capacidade de computação, mas essencialmente porque as margens de erro associadas ao método de traçado de raios e as incertezas associadas aos dados introduzidos, ultrapassam até certo ponto o ganho que se obtém pela contínua introdução de detalhe.

O segundo factor já foi explanado no Capítulo 3.2 e trata-se das alterações ao projecto de execução de arquitectura, que terão sido decididas durante a obra de reabilitação. Estas alterações foram identificadas e estão listadas na Tabela 3.1. Foram posteriormente caracterizadas para introdução no modelo numérico.

Finalmente, o terceiro factor diz respeito a algumas incoerências encontradas entre os desenhos do projecto de execução de arquitectura, que tiveram de ser resolvidas para a introdução dos dados.

Importa referir que na construção do modelo numérico, durante o processo de simplificação da geometria do espaço, foram sendo feitos testes no programa CATT e verificou-se que a introdução de detalhes geométricos que alteram o volume total do espaço, reflectem-se como esperado no tempo de reverberação, em maior ou menor grau. Fala-se, por exemplo, dos degraus na nave, dos nichos na capela-mor, dos vãos sobre as capelas laterais, mas essencialmente do número de faces na representação discretizada do tecto em abóbada da nave e coro-alto. Nesta última, testou-se no CATT o uso de 6, 8 e 12 faces, verificando-se uma diferença importante entre o uso de 6 e 8 segmentos, mas uma diferença pálida mas ainda notória, entre 8 e 12 segmentos. Optou-se assim por adoptar 12 segmentos.

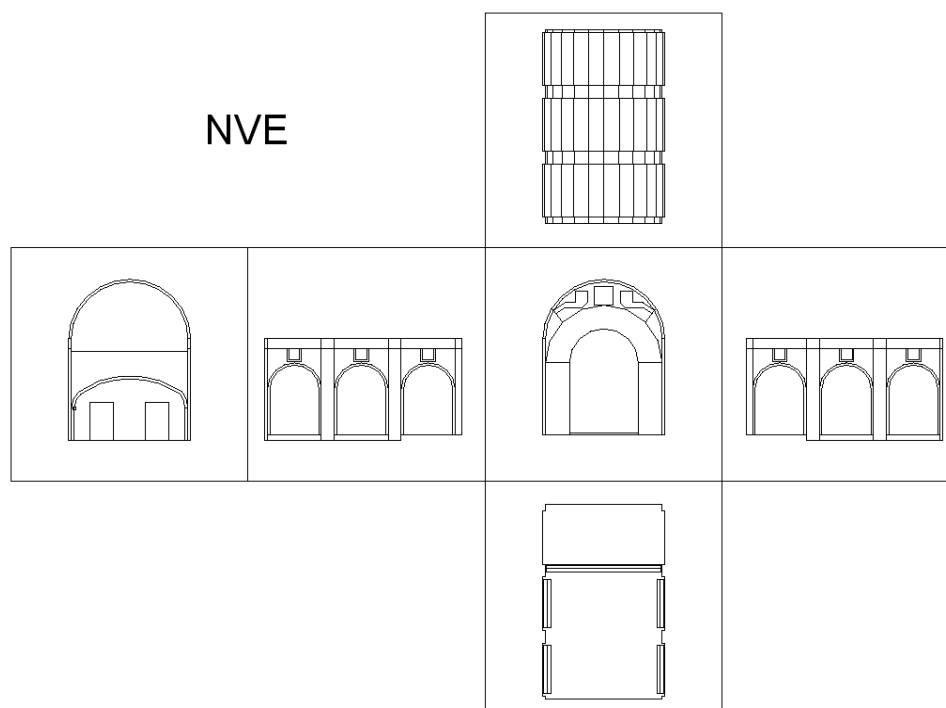


Figura 5.2 – Exemplo das projecções ortogonais executadas - volume Nave (NVE)

A Tabela 5.2 a seguir, apresenta o total de dados geométricos introduzidos nos ficheiros de dados do programa CATT.

Tabela 5.2 – nº de dados geométricos do modelo por cada volume e os totais

Volume (trigrama)	Nº de cantos	Nº de planos
NIC	36	20
ALM	107	49
NVE	561	228
CRO	140	73
CS1	59	30
CS2	70	36
CS3	70	37
CN1	70	35
CN2	70	36
CN3	70	37
MOB	328	145
ECA	34	24

TOTAL =

1615	750
------	-----

5.3.2 Materiais de revestimento e coeficientes de absorção sonora

Retomando a discussão do capítulo 2.2, a partir do momento em que aceitamos a premissa de Beranek [4] de que o valor do coeficiente de absorção a usar na fórmula de Sabine pode ser superior à unidade, e portanto a existência de 2 diferentes coeficientes de absorção sonora para um material e por gama de frequência, em função da utilização da fórmula de Sabine ou da fórmula de Eyring para o cálculo de TR, devemos formular a questão: e para as simulações numéricas usando o método de traçado de raios?

Em simulação numérica, as características de absorção dos materiais são dadas atribuindo coeficientes de absorção sonora, variando entre 0 e 1, ou entre 0% e 100%, por bandas de frequências de oitava.

Já nos ensaios em laboratório para determinação dos coeficientes de absorção sonora (NP EN ISO 354:2007, EN ISO 11654), a fórmula usada para o seu cálculo, após as medições efectuadas de tempo de reverberação com e sem a amostra, baseia-se na fórmula de Sabine.

É possível encontrar no mercado, casos de produtos de tratamento acústico que foram ensaiados em laboratórios devidamente acreditados e que apresentam valores de coeficiente de absorção sonora que ultrapassam a unidade em algumas bandas de frequências.

Por tudo isto, na simulação numérica desta dissertação serão considerados valores de coeficiente de absorção sonora a introduzir na simulação numérica, os valores obtidos pela aplicação da expressão (5.3), a partir dos dados dos resultados laboratoriais das amostras ensaiadas pelos fabricantes dos produtos. Esta fórmula foi obtida a partir da expressão (2.14) evidenciada por Beranek [4].

$$\alpha_{ey} = 1 - 10^{\left(-\frac{\alpha_{sab}}{2,3}\right)} \quad (5.3)$$

Os materiais de revestimento aplicados na reabilitação da igreja, foram identificados e listados.

Investigação foi feita em bibliografia especializada [2], [3], [5], [13] e contacto com fornecedor do sistema de tratamento acústico aplicado no tecto em abóbada, para estabelecer valores dos coeficientes de absorção sonora para as frequência em bandas de oitava, centradas em 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz e 4 kHz.

Tabela 5.3 – Caracterização do coeficiente de absorção sonora de materiais de revestimento

Materiais e condições de montagem	Coeficientes de absorção sonora para as frequências indicadas expressas em Hz.					
	125	250	500	1k	2k	4k
Pedra original	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Pedra original com baixos relevos	0,06	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03
Pedra Nova	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Reboco	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04
Sistema de lã mineral e acabamento em reboco projectado.	0,15	0,34	0,60	0,65	0,70	0,70
Sistema de painéis de régua de madeira pintada, com frestas aparentes, confinando com caixa-de-ar preenchida com material absorvente sonoro.	0,42	0,46	0,50	0,40	0,35	0,30
Azulejo	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Vidro	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Estores	0,05	0,10	0,15	0,15	0,20	0,25
Madeira	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Madeira – mobiliário	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04
Cadeiras vazias - audiência	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01
Metal - projector e armário	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Pessoas	Áreas de absorção sonora equivalente expressas em m ² , para as frequências indicadas expressas em Hz.					
	125	250	500	1k	2k	4k
Pessoas de pé	0,19	0,33	0,44	0,42	0,46	0,37

Deve ser notado que para esta fase de calibração, foram incluídas no modelo numérico um total de 3 pessoas de pé, 2 na Nave e 1 no Coro Alto, e respectiva absorção, correspondendo às 3 pessoas que estiveram no local durante o período de medições. Mais tarde, para as restantes simulações descritas no Capítulo 6, as 3 pessoas de pé foram retiradas do modelo.

5.3.3 Posição de fontes e de receptores

Sendo o objectivo desta fase o da calibração do modelo numérico, as posições das fontes e dos receptores adoptadas são as mesmas posições escolhidas durante as medições acústicas efectuadas (vide Figura 4.2). As coordenadas das posições foram identificadas durante as medições e introduzidas nos ficheiros de dados do programa.

5.3.4 Características do ar (meio de propagação)

Foram introduzidos no software CATT, os dados de Temperatura, 12,8 °C e de Humidade Relativa, 64%, recolhidos durante as medições acústicas efectuadas.

5.3.5 Plano de Simetria

Na caracterização geométrica e material do caso de estudo, no capítulo 3.2, é referido que a igreja apresenta um plano de simetria. Esta afirmação é correcta no contexto daquele capítulo. Porém, esta simetria não é totalmente perfeita, existindo pontuais e pequenas diferenças que se fazem agora reflectir na construção do modelo numérico e que se listam de seguida:

- 2 nichos de pequena dimensão na parede Sul da capela-mor, que resultam do fecho de duas pequenas janelas;
- as capelas laterais sul têm na parede de fundo uma janela em cada, cobertas por estores, enquanto as capelas laterais norte têm na parede de fundo uma porta de madeira em cada;
- as janelas interiores por cima dos arcos de entrada de cada uma das capelas laterais, têm profundidades diferentes a sul e a norte;
- a distribuição da mobília, mesa de oradores, palanque e cadeiras de audiência, não respeitam o plano de simetria mencionado e portanto as fontes e receptores do modelo numérico também não.

5.3.6 Imagens do modelo numérico

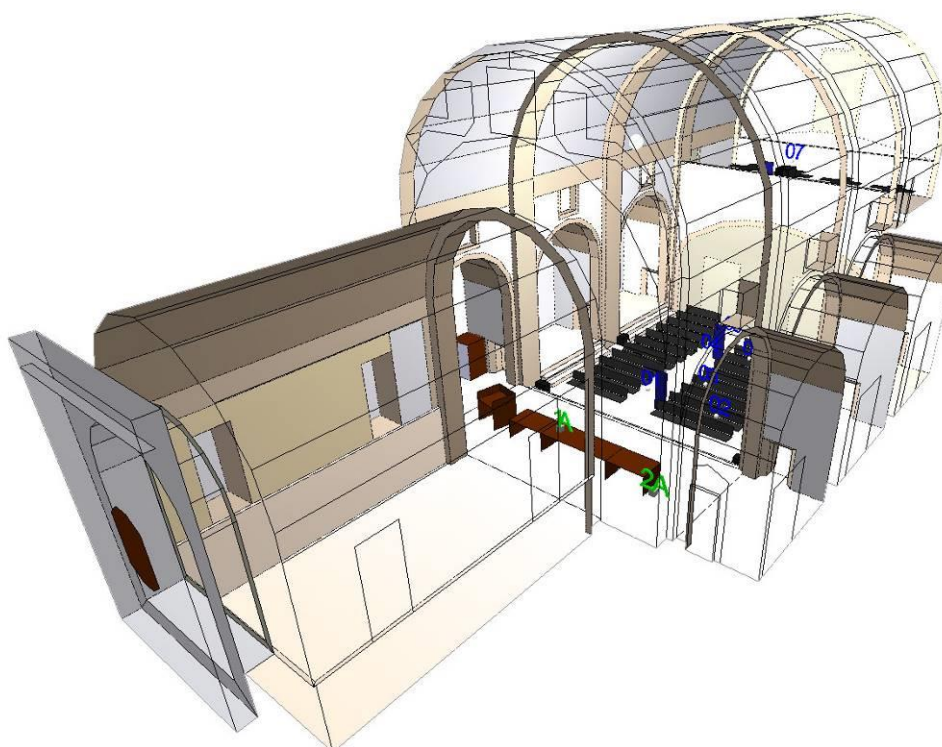


Figura 5.3 – Perspectiva do modelo do auditório

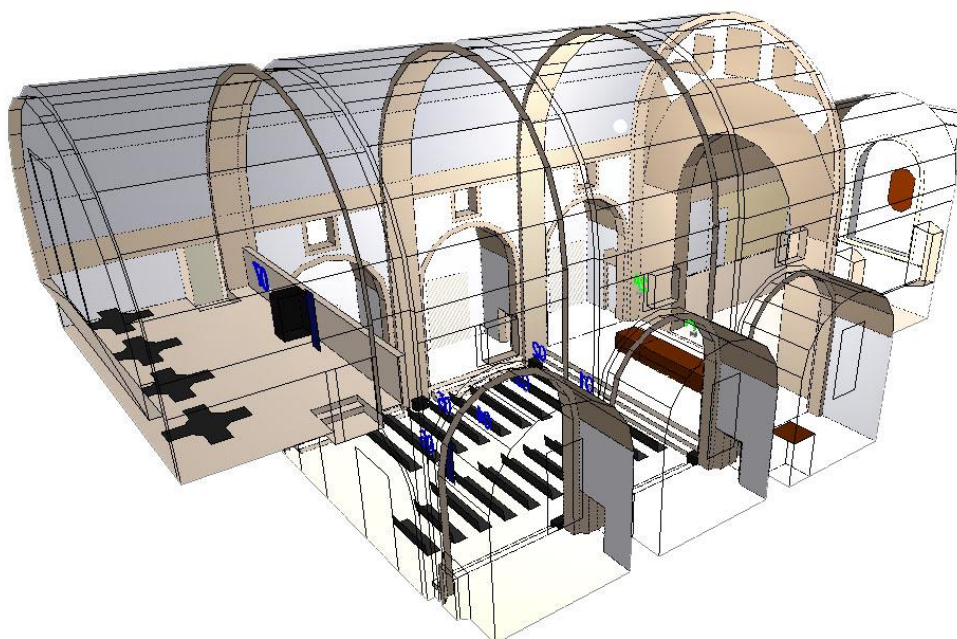


Figura 5.4 – Perspectiva do modelo do auditório



Figura 5.5 – Perspectiva do modelo do auditório a partir do interior da Capela-Mor.

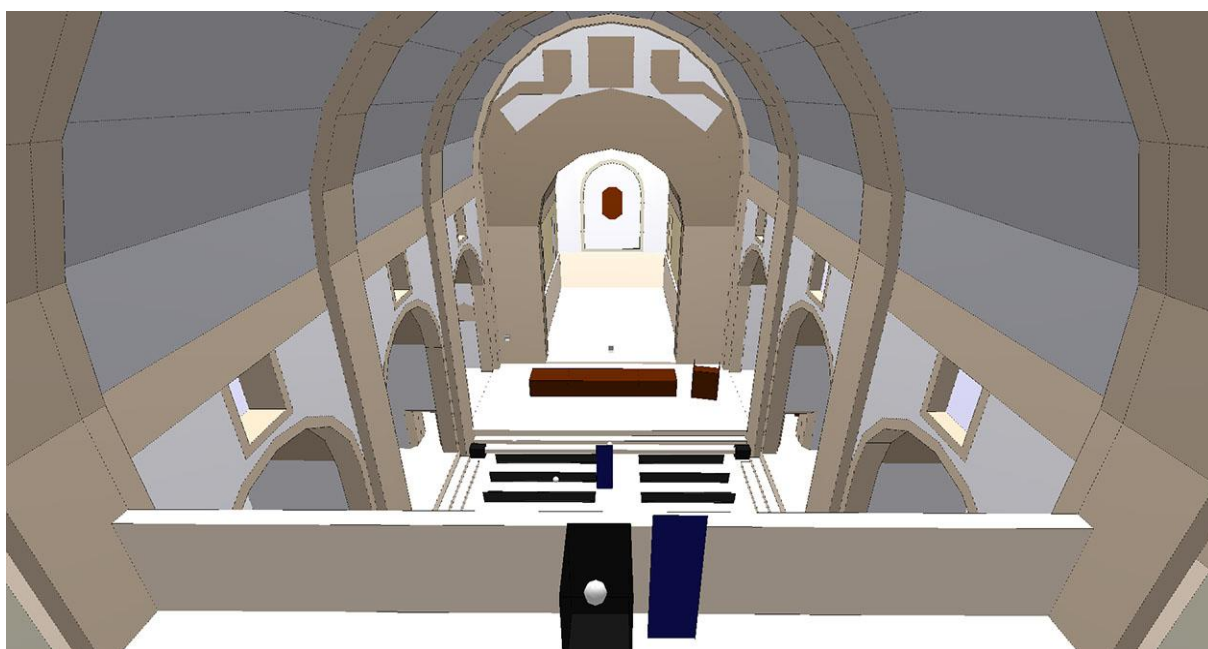


Figura 5.6 – Perspectiva do modelo do auditório a partir do Coro Alto.

5.4 Calibração do modelo numérico

5.4.1 Parâmetros e objectivos da calibração do modelo numérico

A calibração será feita tendo como objectivo principal o encontro dos valores calculados da média espacial de tempo de reverberação sob a forma do parâmetro T_{30} , por bandas de oitava de 125 Hz a 4 kHz, obtidos na simulação computacional do modelo numérico, com os valores homólogos obtidos na medição acústica realizada no espaço do auditório.

A calibração será considerada satisfatória quando se atingirem desvios absolutos máximos de 0,1 s, por banda de frequência.

Reproduz-se de seguida o objectivo dos valores de tempo de reverberação, sob a forma tabular e gráfica:

Tabela 5.4 – Objectivo na calibração do modelo numérico. TR de medição e desvio absoluto máximo. Gama de valores admissíveis.

Banda de Frequência (Hz)	TR medição (s)	Desvio absoluto máximo (s)	TR_{mín} (s)	TR_{Máx} (s)
125	4,08	± 0,1	3,98	4,18
250	3,34	± 0,1	3,24	3,44
500	3,13	± 0,1	3,03	3,23
1000	2,71	± 0,1	2,61	2,81
2000	2,46	± 0,1	2,36	2,56
4000	2,06	± 0,1	1,96	2,16

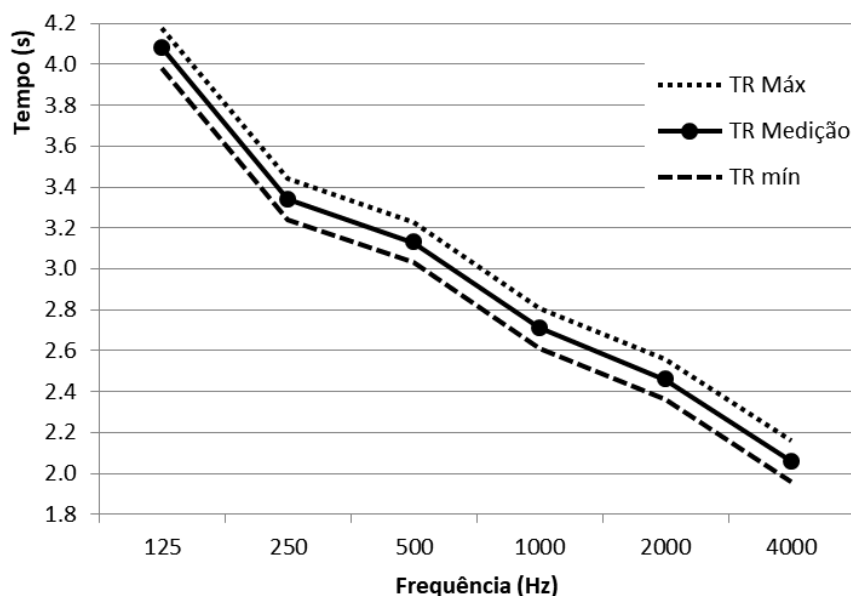


Figura 5.7 – Gama de valores de tempo de reverberação para satisfação da calibração do modelo

No processo de calibração do modelo numérico serão ainda comparados os parâmetros acústicos EDT, D_{50} , RASTI e STI, entre os valores medidos *in situ* e obtidos dos resultados da simulação para calibração, para detectar valores que possam ser considerados anómalos e requeiram atenção.

5.4.2 Absorção do som no ar

As primeiras simulações para calibração, que entretanto foram descartadas, apontavam para um valor de tempo de reverberação na banda de frequências dos 4 kHz demasiado baixo, em comparação com outras bandas de frequências e com as medições acústicas efectuadas. Depois de algumas novas tentativas para perceber a razão do problema, percebeu-se que aquele valor resultava assim devido a um efeito excessivo de absorção do som no ar. A função de cálculo da absorção do ar tinha sido seleccionada no programa CATT e os valores de absorção tinham sido deixados à estimativa automática do mesmo, considerando as características de temperatura e humidade relativa do ar introduzidas.

Para corrigir esta situação, recorreu-se à introdução manual dos valores de absorção nas várias bandas de frequência, para as mesmas características do ar.

Os valores introduzidos foram obtidos a partir de tabelas elaboradas por Cyril M. Harris [14] e são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Valores de absorção do som no ar

Banda de Frequência (Hz)	Absorção no ar (m^{-1})
125	7×10^{-5}
250	$1,6 \times 10^{-4}$
500	$3,8 \times 10^{-4}$
1000	$9,2 \times 10^{-4}$
2000	$2,28 \times 10^{-3}$
4000	$6,32 \times 10^{-3}$

Na sequência da introdução dos valores da Tabela 5.5, o valor de tempo de reverberação para a banda de 4 kHz tornou-se coerente com os valores das restantes bandas de frequências e com as medições acústicas efectuadas. Procedeu-se então para as simulações para calibração do modelo numérico.

5.4.3 Número de raios

O número de raios emitidos e rastreados impacta na precisão do método de traçado de raios, aumentando a precisão com o aumento do número de raios.

O programa CATT tem a capacidade de sugerir para cada modelo em estudo, o número mínimo de raios aconselhável, para garantir uma boa densidade de reflexões e portanto a fiabilidade dos resultados [15]. No modelo do caso de estudo foram sugeridos 24000 raios.

Como a licença do programa CATT cedida para fins académicos limita a 5000 raios, uma grande diferença para os 24000 raios aconselhados, foi necessário adoptar um procedimento adicional.

Tirando partida do conhecimento que a distribuição dos raios emitidos pelo programa CATT é aleatória nas 3 dimensões para a fonte omnidireccional, fizeram-se nesta fase 5 simulações de 5000 raios cada uma, num total de 25000 raios. No final calcularam-se as médias para uso nesta dissertação e também os desvios padrão para monitorização da estabilidade do método.

5.4.4 Simulação 1 para calibração

A primeira simulação usou os dados apresentados até agora, nomeadamente os dados geométricos apresentados no capítulo 5.3.1, os dados de materiais de revestimento apresentados no capítulo 5.3.2, as posições de fontes e de receptores indicadas no capítulo 5.3.3, as características do ar apresentadas no capítulo 5.3.4 e os valores de absorção do ar tabelados no capítulo 5.4.2.

Os resultados obtidos são os apresentados na Tabela 5.6 e na Figura 5.8.

Tabela 5.6 – Resultados de TR da simulação 1 da fase de calibração

Banda de Frequência (Hz)	TR calibração Simulação 1 (s)	TR _{mín} (s)	TR _{Máx} (s)	Satisfaz o critério (Sim/Não)
125	4,27	3,98	4,18	Não
250	3,12	3,24	3,44	Não
500	2,68	3,03	3,23	Não
1000	2,59	2,61	2,81	Não
2000	2,27	2,36	2,56	Não
4000	1,89	1,96	2,16	Não

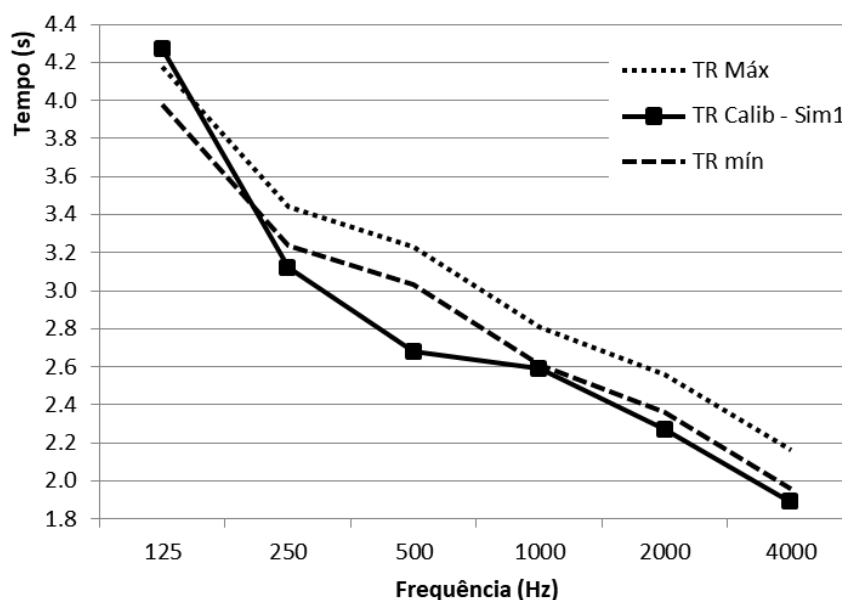


Figura 5.8 – Resultados de TR da simulação 1 da fase de calibração

Considerando que é uma primeira simulação, os valores não diferem demasiado e acima de tudo têm uma distribuição por frequência semelhante ao objectivo, o que foi um sinal positivo para a expectativa de conseguir cumprir satisfatoriamente o critério de calibração definido. No entanto, esse critério não foi ainda atingido nesta simulação em nenhuma das bandas de frequência, sendo necessário proceder ao ajuste dos dados de materiais de revestimento.

Apresentam-se ainda os resultados da simulação para os restantes parâmetros acústicos, em comparação com os valores das medições.

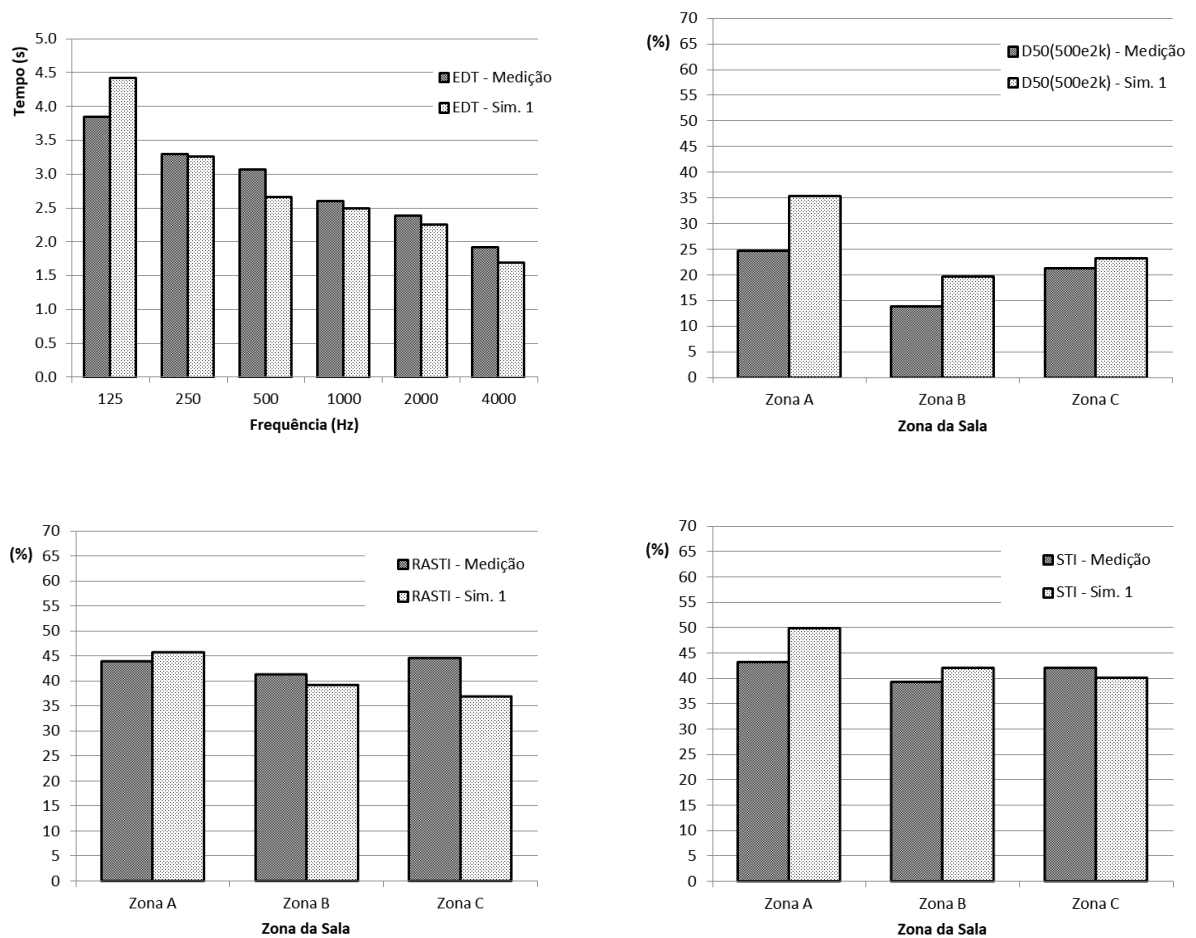


Figura 5.9 – Resultados da simulação 1 de EDT, D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI, e valores de medição acústica

5.4.5 Simulação 2 para calibração

Para a segunda simulação, efectua-se ajustes nos valores dos coeficientes de absorção sonora dos materiais de revestimento, para ir ao encontro dos objectivos da calibração. Começa-se pelos dois materiais para tratamento acústico já instalados durante a reabilitação, que é onde recaem a quase totalidade de unidades de Sabine do modelo. Os novos valores são apresentados de seguida na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Novos valores de coeficientes de absorção sonora de dois materiais de revestimento

Materiais e condições de montagem	Coeficientes de absorção sonora para as frequências indicadas expressas em Hz.					
	125	250	500	1k	2k	4k
Sistema de lâ mineral e acabamento em reboco projectado.	0,17	0,29	0,42	0,56	0,60	0,60
Sistema de painéis de régua de madeira pintada, com frestas aparentes, confinando com caixa-de-ar preenchida com material absorvente sonoro.	0,42	0,46	0,40	0,36	0,31	0,30

Os novos valores foram introduzidos no ficheiro de dados e a segunda simulação foi calculada, tendo-se obtido os resultados de tempo de reverberação a seguir apresentados na Tabela 5.8 e na Figura 5.10.

Tabela 5.8 – Resultados de TR da simulação 2 da fase de calibração

Banda de Frequência (Hz)	TR calibração Simulação 2 (s)	TR _{mín} (s)	TR _{Máx} (s)	Satisfaz o critério (Sim/Não)
125	4,08	3,98	4,18	Sim
250	3,35	3,24	3,44	Sim
500	3,12	3,03	3,23	Sim
1000	2,64	2,61	2,81	Sim
2000	2,44	2,36	2,56	Sim
4000	1,93	1,96	2,16	Não

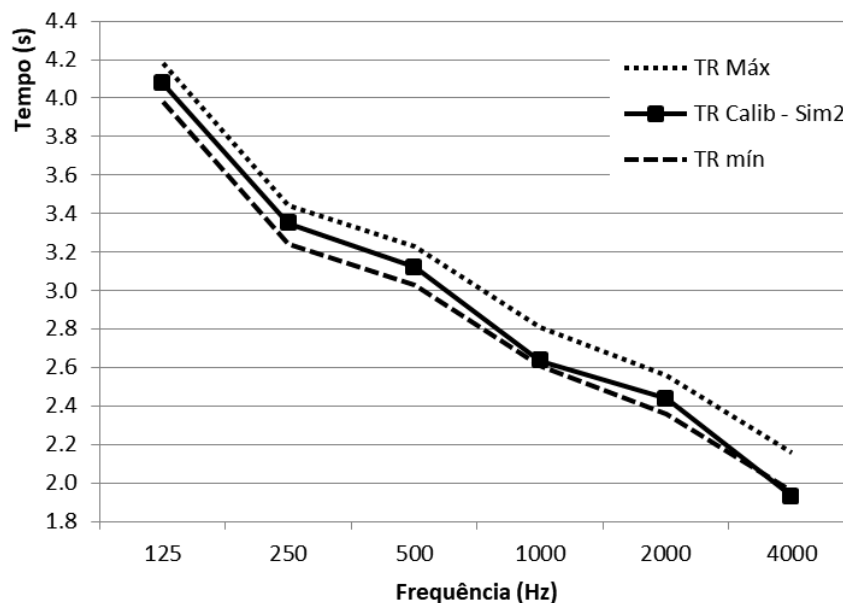
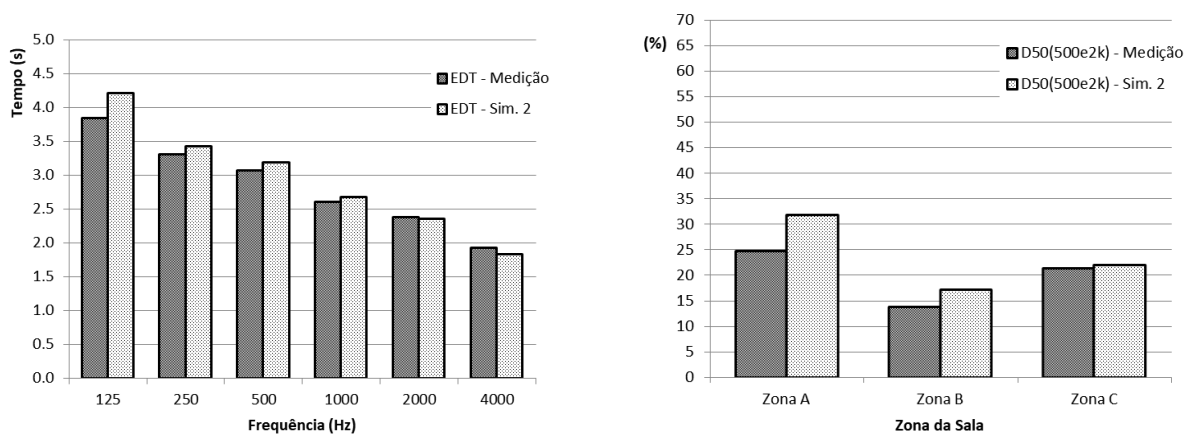


Figura 5.10 – Resultados de TR da simulação 2 da fase de calibração

Nesta simulação, apenas na banda de frequência dos 4kHz o critério de satisfação não é cumprido. Os resultados para os restantes parâmetros acústicos, em comparação com os valores das medições, são apresentados de seguida.



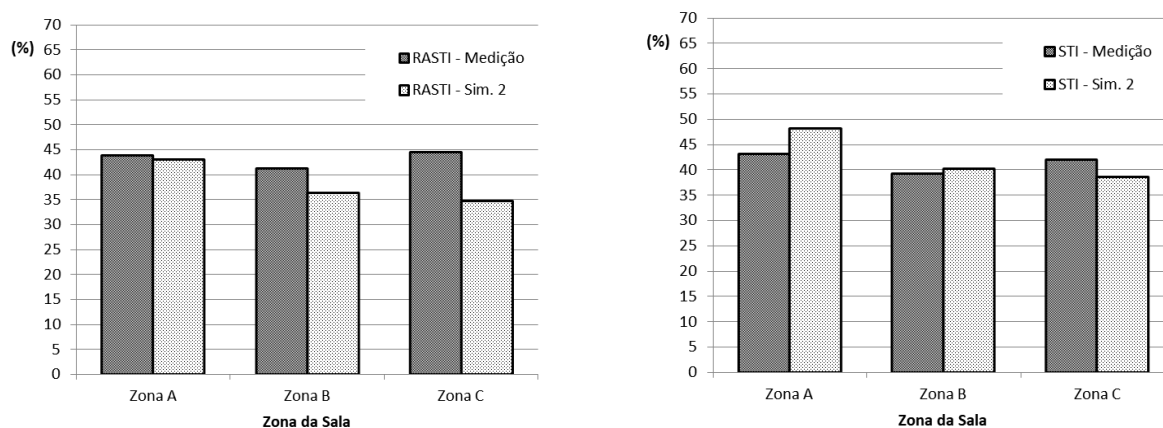


Figura 5.11 – Resultados da simulação 2 de EDT, D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI, e valores de medição acústica

Após a segunda simulação, importa notar que com a aproximação dos valores de tempo de reverberação simulados aos valores medidos, verifica-se em simultâneo uma aproximação dos valores dos restantes parâmetros acústicos simulados e medidos.

5.4.6 Simulação 3 para calibração

A terceira simulação para calibração visa pequenos ajustes para atingir a satisfação plena do critério de calibração em todas as bandas de frequências.

Os novos valores são apresentados de seguida na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Novos valores de coeficientes de absorção sonora de dois materiais de revestimento

Materiais e condições de montagem	Coeficientes de absorção sonora para as frequências indicadas expressas em Hz.					
	125	250	500	1k	2k	4k
Reboco	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03
Sistema de lã mineral e acabamento em reboco projectado.	0,17	0,29	0,41	0,55	0,59	0,56
Sistema de painéis de régua de madeira pintada, com frestas aparentes, confinando com caixa-de-ar preenchida com material absorvente sonoro.	0,42	0,46	0,40	0,36	0,31	0,28

Os novos valores foram introduzidos no ficheiro de dados e a segunda simulação foi calculada, tendo-se obtido os resultados de tempo de reverberação a seguir apresentados na Tabela 5.10 e na Figura 5.12.

Tabela 5.10 – Resultados de TR da simulação 3 da fase de calibração

Banda de Frequência (Hz)	TR calibração Simulação 3 (s)	TR _{min} (s)	TR _{Máx} (s)	Satisfaz o critério (Sim/Não)
125	4,09	3,98	4,18	Sim
250	3,38	3,24	3,44	Sim
500	3,12	3,03	3,23	Sim
1000	2,69	2,36	2,81	Sim
2000	2,49	2,36	2,56	Sim
4000	1,98	1,96	2,16	Sim

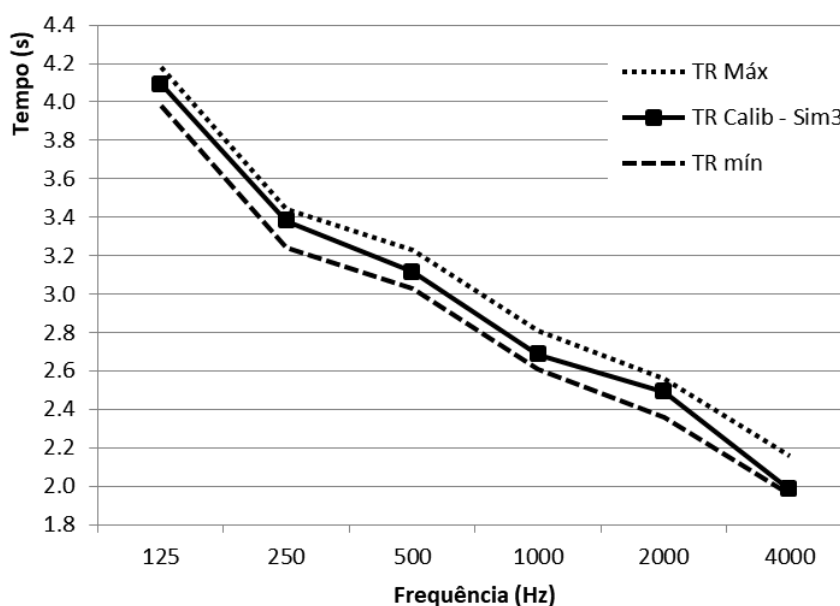


Figura 5.12 – Resultados de TR da simulação 3 da fase de calibração

A Figura 5.13 apresenta os valores de tempo de reverberação da terceira simulação, com os valores da medição acústica, sob a forma de gráfico de barras.

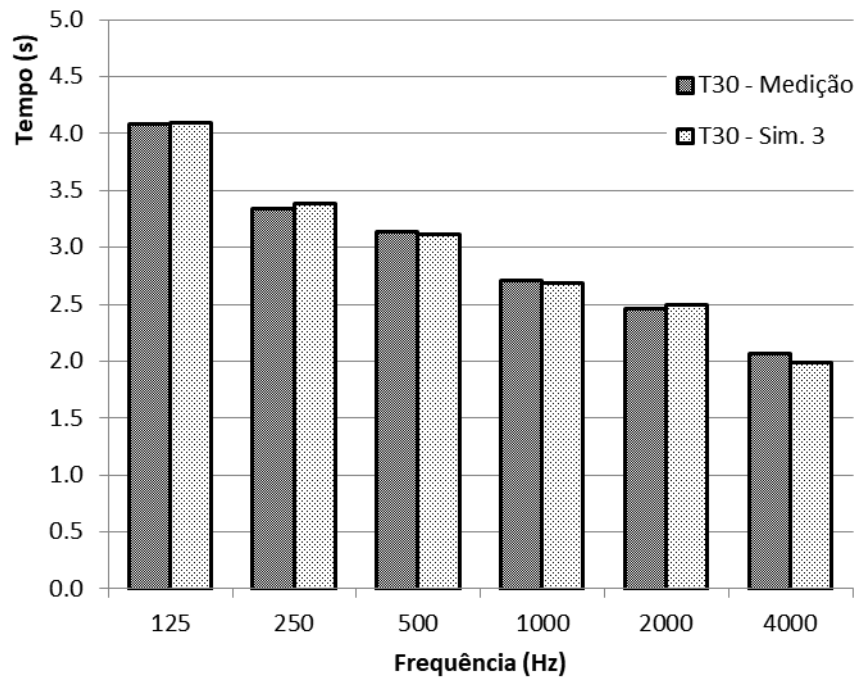
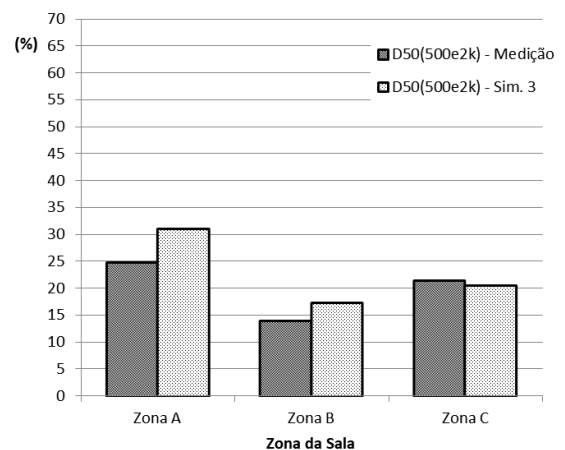
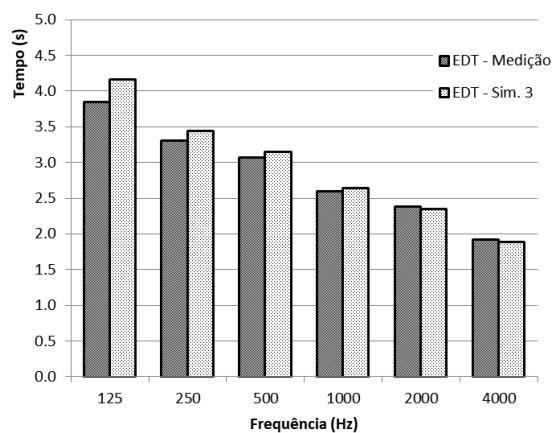


Figura 5.13 – Resultados de TR da simulação 3 da fase de calibração, e valores da medição

Assim, com a satisfação plena do critério de calibração em todas as bandas de frequências, considera-se o modelo numérico calibrado.

Apresentam-se de seguida os resultados da terceira e final simulação para calibração, para os restantes parâmetros acústicos, em comparação com os valores das medições.



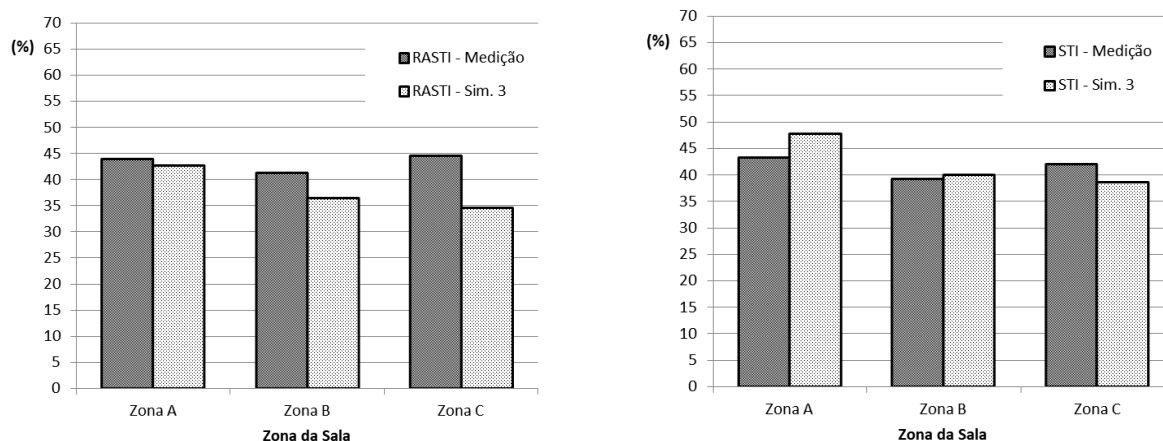


Figura 5.14 – Resultados da simulação 3 de EDT, D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI, e valores de medição acústica

Concluída a calibração e numa apreciação global, os valores dos parâmetros EDT, D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI apresentam valores satisfatórios, próximos dos valores obtidos na medição acústica. Ainda assim, devem ser notadas as seguintes particularidades:

- Os valores de EDT da simulação estão um pouco exagerados nas baixas frequências, chegando mesmo a ser superior ao valor de T_{30} nas bandas de 125 Hz e 250 Hz. Esta inversão entre EDT e T_{30} não ocorreu nas medições acústicas do auditório, sendo uma situação de ocorrência invulgar;
- O valor de D_{50} (500Hz, 2kHz) da simulação, é um pouco optimista nas zonas da sala A e B;
- Os valores de RASTI da simulação são um pouco baixos relativamente aos medidos, em particular nas zonas B e C da sala;
- Os valores de STI da simulação aproximam-se bem dos valores medidos, representado de forma mais coerente a inteligibilidade, relativamente ao parâmetro RASTI.

Na Tabela 5.11 apresentam-se os valores médios de absorção sonora por banda de frequência, dos planos do modelo calibrado.

Tabela 5.11 – Valores médios de absorção sonora, dos planos do modelo calibrado.

Banda de Frequência (Hz)	$\alpha_{\text{médio}}$
125	0,06
250	0,08
500	0,09
1000	0,11
2000	0,12
4000	0,12

6 ESTRATÉGIAS DE INTERVENÇÃO E SIMULAÇÕES

6.1 Desenvolvimento de estratégias de correcção acústica

Uma boa inteligibilidade da palavra procura-se desenhando espaços com volume e tempo de reverberação baixos, com as primeiras reflexões a acontecer essencialmente nas superfícies mais próximas (tecto e paredes), controlando a sua direcção e atraso de chegada, e havendo pouca necessidade de difusão.

Num projecto criado de raiz, estes critérios poderão ser implementados com alguma liberdade. Porém, numa reabilitação de um edifício de valor histórico, a geometria do espaço existe e deverá ser respeitada, apenas sendo possível efectuar criteriosas alterações de revestimentos ou introdução de estruturas fixas ou móveis e não intrusivas, em materiais adequados e não anacrónicos, que possam potenciar o ambiente acústico que se pretende atingir.

6.1.1 Estratégia geral para o caso de estudo

No caso de estudo, e de um ponto de vista holístico, importa garantir que a energia sonora emitida nas fontes seja guiada para a zona da audiência, controlando o atraso. A energia que passe a audiência e seja reflectida de novo para ela, ou a energia que chegue à audiência com demasiado atraso, deverá idealmente ser bastante absorvida nas reflexões anteriores para que chegue apenas uma pequena fracção dessa energia, mantendo assim algum tempo de reverberação, sem prejudicar a definição e inteligibilidade da palavra.

6.1.2 Caso 1 – som reflectido no tecto abobadado da nave e coro alto

Tal como referido no capítulo 3.4.4, o auditório que é o caso de estudo desta dissertação e que inicialmente foi construído para servir a função de igreja católica, tem tectos elevados, elevada volumetria e muito elevado rácio de volume por número de lugares.

Neste cenário, torna-se impossível tirar proveito das reflexões no tecto como fonte de primeiras reflexões, devido à distância que o som tem de percorrer entre o emissor e o receptor, mais de 26 metros e intervalos de tempo entre o som directo e as reflexões do tecto acima dos 60 ms. Mesmo que se avançasse para a estratégia de usar as reflexões do tecto,

haveria ainda um risco razoável, que a geometria côncava da abóbada da nave promovesse a concentração da energia sonora reflectida no tecto em alguns lugares da audiência na nave e no coro alto.

Também não é possível contar com a introdução de uma canópia ou elementos pendurados no tecto para exercer as primeiras reflexões, por desadequação da sua integração na arquitectura a preservar do espaço.

No espírito da estratégia geral definida no capítulo 6.1.1, é desejável que o tecto tenha bastante absorção sonora.

Talvez por este motivo, na reabilitação que foi feita ao espaço, o tecto em abóbada nos volumes da nave e do coro alto foram revestidos com materiais absorventes sonoros. Neste caso o material de revestimento aplicado foi um sistema de lã mineral com acabamento em 2 camadas de reboco projectado, com nome comercial Sonacoustic.

Importa referir que o sistema de revestimento acima descrito é anacrónico ao edifício. Porém, ao olho humano e ao toque do dedo, apenas importa a última camada e essa mimetiza bem um revestimento que respeita a cronologia.

6.1.3 Caso 2 – som reflectido nas paredes de fundo da nave e coro alto

Tal como no Caso 1, o som reflectido nas paredes de fundo dos dois volumes onde se encontra audiência, a nave e o coro alto, deverá ser o mais possível absorvido pelos revestimentos a aplicar. Evita-se assim que a fracção de energia sonora que é reflectida de volta à audiência, regresse com nível semelhante àquele com que a atravessou antes causando redução da inteligibilidade. Evita-se ainda a possibilidade de ocorrência de eco junto dos oradores, com o incómodo que lhe está associado.

Também este caso já se encontra acautelado pelos revestimentos executado nas obras de reabilitação. No caso da parede de fundo do coro alto, foi aplicado o mesmo sistema que foi aplicado no tecto em abóbada. No caso da parede de fundo da nave, a parede oeste onde se encontram as duas portas principais de entrada do auditório, o revestimento aplicado foi um sistema de painéis de régua de madeira pintada, com frestas aparentes, confinando com caixa-de-ar preenchida com material absorvente sonoro.

6.1.4 Caso 3 – controlo adicional do tempo de reverberação

O revestimento para correcção acústica do tecto em abóbada e das paredes de fundo da nave e coro alto, abordaram os casos descritos nos dois capítulos anteriores.

Porém, quando se comparam os valores do tempo de reverberação das medições acústicas do auditório, na Tabela 4.3, com os objectivos identificados no Capítulo 3.5.1, percebe-se que serão necessárias áreas adicionais com propriedades de grande absorção sonora.

A introdução desses novos elementos pode ser feita pela substituição ou cobertura de revestimentos existentes com pouca absorção sonora, ou introdução de novas estruturas móveis ou fixas que sejam coerentes com a preservação da arquitectura do espaço.

Relativamente à substituição ou cobertura de revestimentos existentes, alguns casos não são compatíveis desde logo, com o princípio de preservação do valor histórico do espaço. Não é aceitável a alteração ou cobertura dos elementos em pedra original, estruturais ou decorativos, e dos azulejos.

Já na nova pedra instalada na reabilitação, que cobre os pavimentos e lambris, seria possível por exemplo cobrir com um tapete-passadeira o pavimento do corredor central da nave, bem como a parte da nave onde está a mesa dos oradores e palanque, a exemplo da igreja de Santo Agostinho em Coimbra (*vide* Figura 3.1). Trata-se de uma solução anacrónica relativamente ao período de construção deste edifício, mas que foi introduzida nas igrejas e é ainda comum. Porém, o facto de a área coberta ser limitada e a absorção sonora desta solução apenas ser relevante na médias-altas e altas frequências, torna-a pouco interessante.

O revestimento em reboco comum cobre uma área significativa das paredes, em particular nos volumes da capela-mor com o nicho, e capelas laterais norte e sul. A alteração de reboco comum para uma solução de sistema de painéis de lã mineral colados à parede e barrados com várias camadas de massa mineral, com nome comercial Baswaphon, pode trazer um aumento de absorção sonora muito considerável.

O princípio desta solução é semelhante ao sistema aplicado no tecto em abóbada, mas a camada de finalização apresenta maior resistência mecânica. Isto é necessário porque estas paredes estão acessíveis.

6.1.5 Caso 4 – som dirigido à capela-mor

Importa falar da fracção de energia sonora que desde as fontes se encaminha para o volume da Capela-Mor. Neste volume, os materiais que o revestem tem muito pouca absorção sonora com um coeficiente de absorção médio inferior a 0,05 em todo o espectro.

Assim, da totalidade da energia sonora que se dirige ao volume da Capela-Mor, uma elevada percentagem é devolvida à Nave e à audiência. E porque a distância percorrida por aquela porção de energia sonora, desde as fontes até às cadeiras da audiência, é superior a 34 metros (com um mínimo de 2 reflexões), a energia sonora que é devolvida vem com intensidade significativa e um atraso superior a 100 ms.

De acordo com Michael Barron [5] Lochner e Burguer propuseram que a energia sonora que chega ao receptor antes dos 95 ms é considerada útil em termos de inteligibilidade da palavra, embora em percentagem decrescente em função do atraso de chegada (vide Figura 2.12). A partir dos 95 ms de atraso, a energia sonora é considerada prejudicial à inteligibilidade da palavra. E é neste último caso que se enquadra a situação acima descrita do caso de estudo.

É assim de todo o interesse criar uma barreira que reflecta o som que das fontes se dirige à capela-mor, e o dirija sem atrasos significativos para a audiência. Esta barreira pode ser materializada sob a forma de uma concha acústica de madeira, que por razões de património seriam móveis, apoiadas sobre rodas. A madeira pode ainda ser pintada à mesma cor dos restantes elementos de madeira existentes no auditório.

A barreira será modular com 9 elementos de 2,2 m de altura e 1,0 m de largura, montados em concha no extremo este da nave, por trás da mesa de oradores e palanque, permitindo a circulação para a capela-mor pelos flancos.

A Figura 6.1 apresenta um exemplo de uma concha acústica semelhante à que se propõe para o auditório caso de estudo, em termos de dimensões. No entanto, neste exemplo a face frontal apresenta um difusor unidireccional, enquanto para o auditório, cuja função principal é palavra, não há muita necessidade de difusão e essa face será lisa.

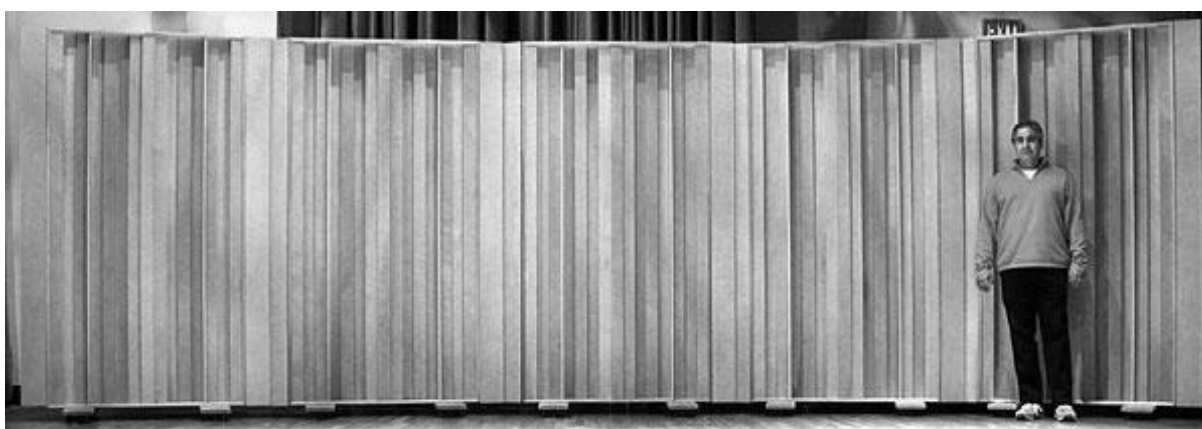


Figura 6.1 – Concha acústica móvel no Disney Performance Hall

A concha acústica tem ainda uma segunda função, desta vez na face inversa. Ao criar uma barreira que impede que parte da energia sonora que entretanto tenha entrado para capela-mor, volte para a nave do auditório. E assim faz todo o sentido aproveitar a face traseira da concha acústica criando uma superfície com elevada absorção sonora, para assim reduzir a intensidade da energia sonora que sofre reflexões na capela-mor. Por razões de integração com a arquitectura existente, propõe-se uma solução semelhante à aplicada na parede oeste da nave, um sistema de régua de madeira pintada com 55mm x 20mm, frestas aparentes de 3mm, confinando com caixa-de-ar preenchida com material absorvente sonoro.

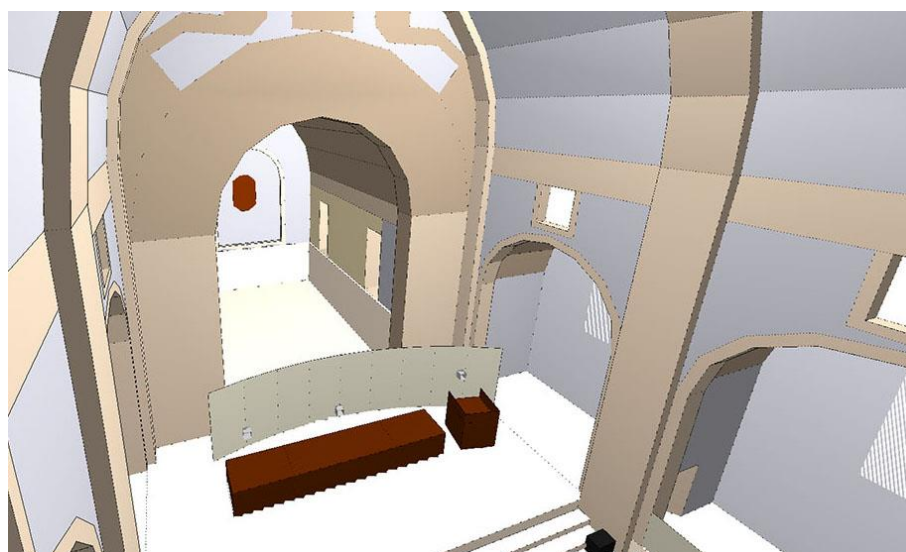


Figura 6.2 – Proposta de concha acústica

6.1.6 Caso 5 – som dirigido às capelas laterais

O som que se dirige às capelas laterais, depois de sofrer reflexões naquele espaço, regressa muito certamente à audiência na nave com algum atraso. A sua contribuição para a definição e inteligibilidade da palavra é improvável e assim, é preferível reduzir a intensidade do som que ali chega. A substituição do revestimento em reboco comum das paredes das capelas, por reboco com características de absorção acústica, foi já proposta na sequência do Caso 3 no Capítulo 6.1.4.

Ainda assim, aproveitando o facto do pavimento da audiência da nave estar num plano 0,5 m inferior ao do pavimento das capelas laterais, propõe-se introduzir guardas nas capelas laterais confinantes com a audiência da nave. Estes elementos são típicos da arquitectura de igreja e podem-se ver, por exemplo, na igreja do Colégio de Santo Agostinho em Coimbra (*vide* Fig. 3.1) ou na igreja de S. Roque em Lisboa (Figura 6.3).



Figura 6.3 – Guardas de capelas laterais na igreja de S. Roque em Lisboa

No que diz respeito às superfícies, estas guardas terão um conceito muito semelhante ao da concha acústica, com superfícies contínuas e planas do lado virado para a audiência, e do lado virado para a capela lateral será o já acima referido sistema de régua de madeira pintada, com frestas aparentes, confinando com caixa-de-ar preenchida com material absorvente sonoro.

As guardas não deverão ultrapassar a altura de 1,0 m, o que combinado com o desnível de 0,5 m dos pavimentos da nave e das capelas laterais, resulta numa barreira de 1,5 m de altura nos flancos da audiência, sentada. As guardas serão articuladas e apoiadas em dobradiças, permitindo a total abertura do espaço para circulação de e para as capelas laterais.

Assim, as duas funções destas guardas seriam o reflexo de parte do som que se dirigia para as capelas e que agora é reflectido sem atrasos para a audiência, e barreira com acréscimo de absorção pelo lado interior, de uma fracção do som que entrou nas capelas laterais.



Figura 6.4 – Proposta de guardas de capelas laterais em posição fechada

6.1.7 Caso 6 – ausência de elementos decorativos

Referiu-se já no Capítulo 3.4.7, o facto de o espaço reabilitado se apresentar agora com a capela-mor e as capelas laterais vazias de altares e elementos decorativos que normalmente recheiam as igrejas. Isto resulta numa ainda maior volumetria, redução de área de absorção e difusão sonora e consequente aumento do tempo de reverberação. Pode-se assim inferir que sem os materiais de absorção acústica instalados durante a reabilitação, este espaço teria actualmente um ainda maior tempo de reverberação que durante os anos em que serviu a função de igreja.

A introdução de mobiliário moderno e minimalista, não traz um alívio a esta situação, propondo-se por isso a alteração das cadeiras instaladas, com estrutura metálica e assento e encosto de plástico, para cadeiras almofadadas no assento e no encosto, aumentando assim significativamente a absorção das mesmas.

A ocupação das capelas laterais com elementos expositivos, quadros, à semelhança do que esteve instalado durante a inauguração deste edifício reabilitado (Figura 6.5), é também recomendada.



Figura 6.5 – Elementos expositivos e decorativos nas capelas laterais durante a cerimónia de inauguração

6.2 Simulação da implementação de estratégias

Para testar a eficácia das estratégias apresentadas no Capítulo 6.1, estas foram implementadas no modelo computacional e testadas com a realização de simulações com o intuito de prever se os parâmetros acústicos atingem os objectivos identificados no Capítulo 3.5. Os resultados destas simulações são apresentados nos capítulos seguintes.

Deve notar-se que foram feitas várias tentativas e alguns ajustes na implementação das estratégias no modelo computacional, sendo que nesta dissertação apenas se apresentam as simulações que são relevantes e que são as listadas na Tabela 6.1.

Para efeitos académicos, começou-se por simular a hipótese de não terem sido introduzidos revestimentos para absorção sonora, nas obras de reabilitação do auditório. Trata-se da Simulação A.

Simulou-se ainda o auditório conforme a geometria e revestimentos da construção e portanto da fase de calibração. Porém, o número e posições das fontes e receptores são alterados conforme é descrito no capítulo seguinte 6.2.1. Trata-se da Simulação B.

A Simulação G tem implementadas todas as estratégias e ainda prevê a ocupação das cadeiras da audiência na nave com 100% de ocupação. Esta simulação é necessária para estabelecer verificações com alguns dos objectivos acústicos (Capítulo 3.5) que estão definidos para salas ocupadas.

Tabela 6.1 – Lista de simulações para implementação de estratégias

Simulação	Estratégias implementadas
A	Se não tivessem sido introduzidos revestimentos para absorção sonora. <ul style="list-style-type: none">– substituição de sistema Sonacoustic por reboco comum– substituição de sistema de régua de madeira com frestas aparentes, por revestimento de madeira simples
B	Modelo com geometria e revestimentos iguais aos do modelo calibrado.
C	Implementação de estratégia de capítulo 6.1.4 <ul style="list-style-type: none">– substituição de reboco comum existente, por sistema Baswaphon
D	Implementação de estratégia de capítulo 6.1.5, sobre a Simulação C. <ul style="list-style-type: none">– substituição de reboco comum existente, por sistema Baswaphon– introdução de concha acústica
E	Implementação de estratégia de capítulo 6.1.6, sobre a Simulação D. <ul style="list-style-type: none">– substituição de reboco comum existente, por sistema Baswaphon– introdução de concha acústica– introdução de guardas nas capelas laterais
F	Implementação de estratégia de capítulo 6.1.7, sobre a Simulação E. <ul style="list-style-type: none">– substituição de reboco comum existente, por sistema Baswaphon– introdução de concha acústica– introdução de guardas nas capelas laterais– substituição de cadeiras existentes por cadeiras almofadadas
G	Simulação igual a F, com ocupação a 100% na audiência da nave.

6.2.1 Posições de Fontes e Receptores

No modelo numérico simulado na fase de calibração, foram usados o mesmo número e posições das fontes e de receptores que foram usadas nas medições acústicas, com o intuito de reproduzir as condições da medição.

As 2 posições de fonte e 7 posições de receptores escolhidas para as medições, foram-no no sentido de explorar diferentes condições de reverberação para melhor caracterizar o TR da sala de acordo com a ISO 3382-1.

Na realização de simulações para implementação de estratégias de melhoria, procurou-se reproduzir também as situações prováveis de utilização do auditório, sem amplificação.

Assim, para a reprodução das condições de utilização prováveis do auditório, foram consideradas 3 posições de fonte: 2 na mesa dos oradores e 1 fonte em frente ao palanque; e

11 posições de receptores: 9 na Nave e 2 no Coro Alto. Totaliza-se desta forma 33 pares fonte-receptor.

Embora a geometria da igreja tenha um plano de simetria, deve ser notado que as novas posições de fontes usadas nas simulações não têm simetria, devido à existência do palanque. Como consequência, adopta-se uma distribuição de receptores que inclui posições nos dois lados do plano de simetria.

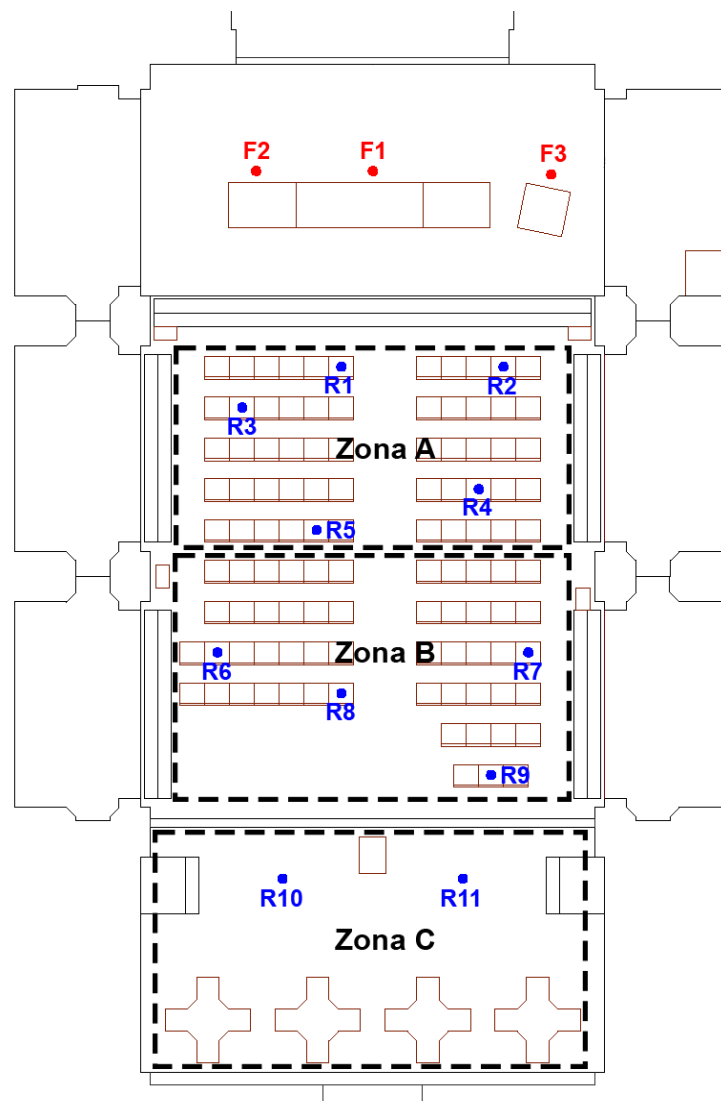


Figura 6.6 – Planta do auditório com marcação das novas posições das 3 fontes e dos 11 receptores

6.2.2 Simulação A

Como já exposto, a simulação A é feita para efeitos académicos. Os coeficientes de absorção sonora dos materiais de revestimento alterados no modelo calibrado, podem ser consultados na Tabela 5.2.

Na Tabela 6.2, Figura 6.7 e Figura 6.8, são apresentados os resultados da simulação A. Nos gráficos, os valores são apresentados juntamente com os resultados do modelo calibrado, para efeitos de comparação.

Tabela 6.2 – Resultados da simulação A

Média Espacial				D50 _(500e2k) (%)	RASTI (%)	STI (%)
f (Hz)	T ₃₀ (s)	EDT (s)				
125	6,61	6,69	Zona A	12	29	23
250	6,81	6,92	Zona B	8	25	19
500	8,18	8,27	Zona C	5	24	18
1000	6,95	7,08				
2000	5,91	6,01				
4000	3,72	3,83				

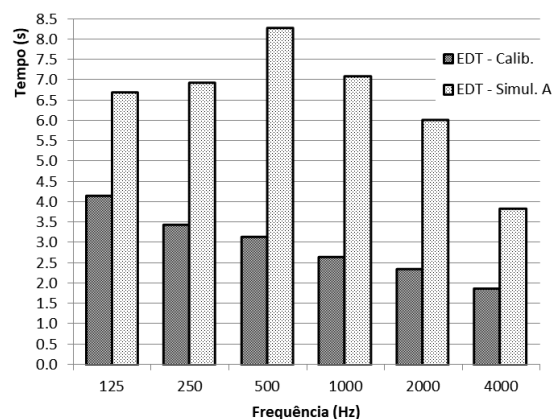
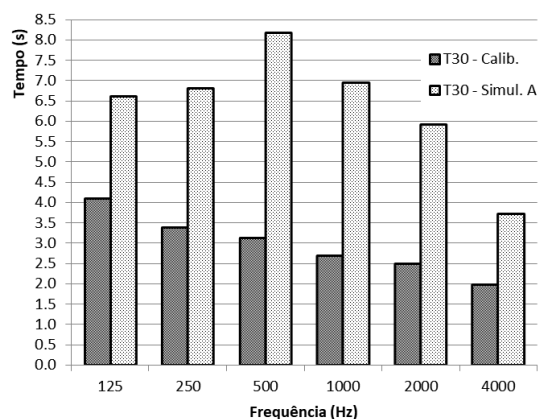


Figura 6.7 – Resultados da simulação A, de TR e EDT

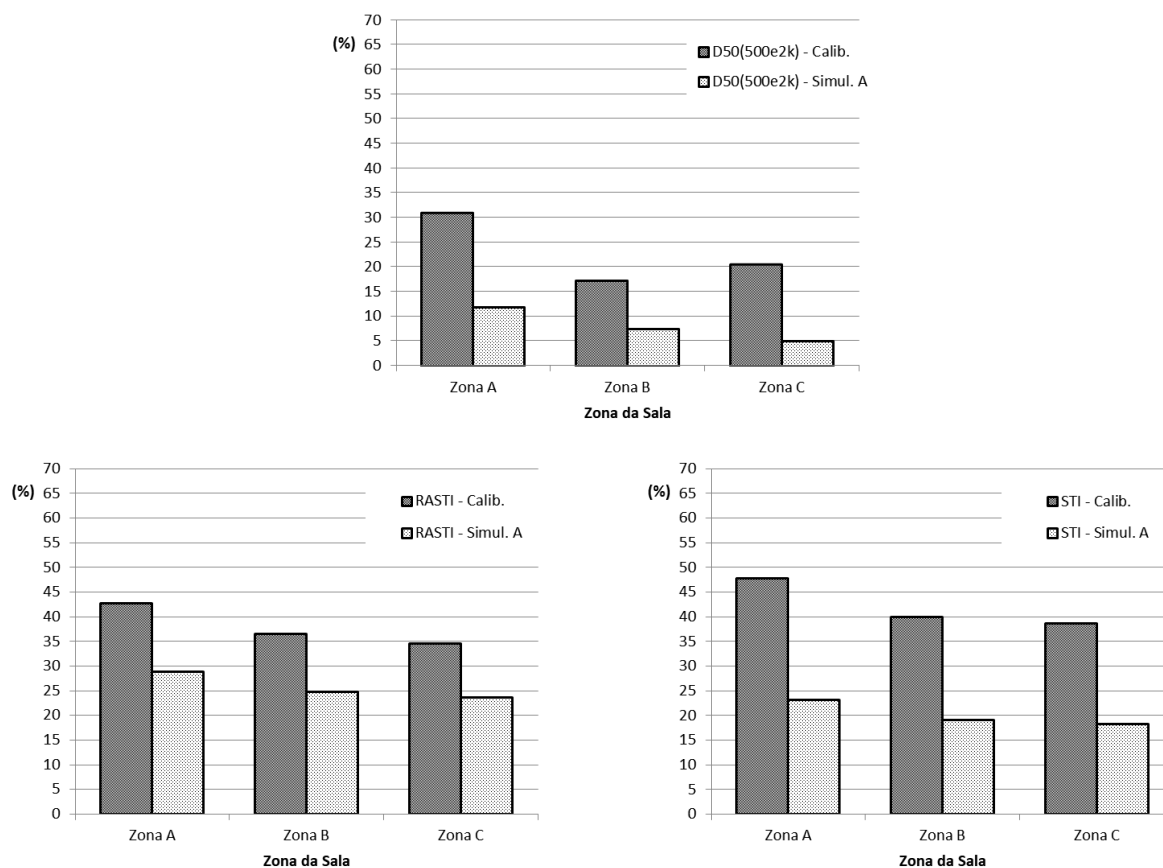


Figura 6.8 – Resultados da simulação A, de D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI

Os resultados desta simulação permitem confirmar por comparação, que a introdução de revestimentos com absorção sonora durante a obra de reabilitação do edifício, foi um passo essencial. Sem tal, o auditório não teria actualmente condições acústicas de funcionamento.

Na Tabela 6.3 apresentam-se os valores médios de absorção sonora por banda de frequência, dos planos do modelo.

Tabela 6.3 – Valores médios de absorção sonora dos planos do modelo na simulação A.

Banda de Frequência (Hz)	$\alpha_{\text{médio}}$
125	0,04
250	0,04
500	0,03
1000	0,03
2000	0,03
4000	0,03

6.2.3 Simulação B

Na Tabela 6.4, Figura 6.9 e Figura 6.10, são apresentados os resultados da simulação B. Como explicado no Capítulo 6.2, esta simulação foi feita para perceber as consequências nos parâmetros acústicos, da alteração adoptada do número e posições de fontes e receptores. Assim, nos gráficos das figuras, os valores desta simulação são apresentados juntamente com os resultados das medições acústicas e do modelo calibrado, para efeitos de comparação.

Tabela 6.4 – Resultados da simulação B

Média Espacial				D50 _(500e2k) (%)	RASTI (%)	STI (%)
f (Hz)	T ₃₀ (s)	EDT (s)				
125	4,41	4,50	Zona A	28	43	39
250	3,64	3,76	Zona B	21	39	35
500	3,36	3,45	Zona C	15	38	35
1000	2,80	2,87				
2000	2,55	2,55				
4000	2,04	2,06				

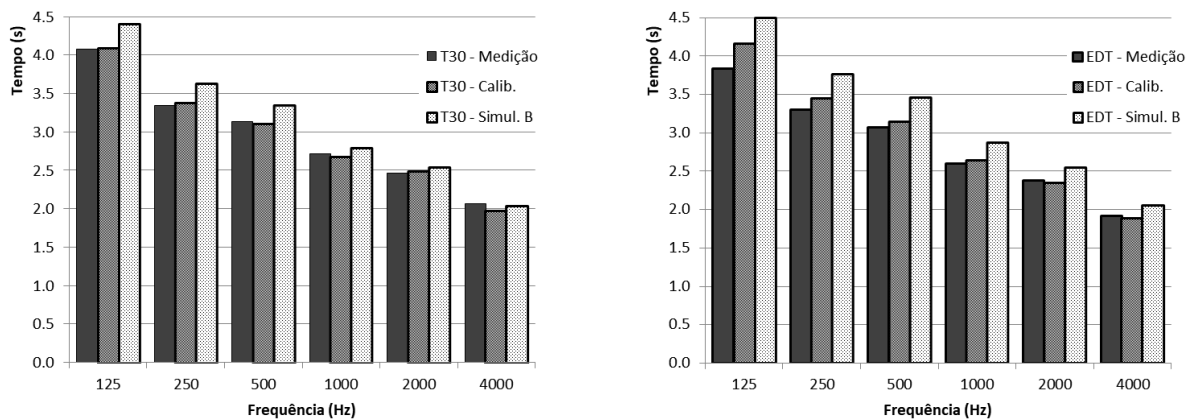


Figura 6.9 – Resultados da simulação B, de TR e EDT

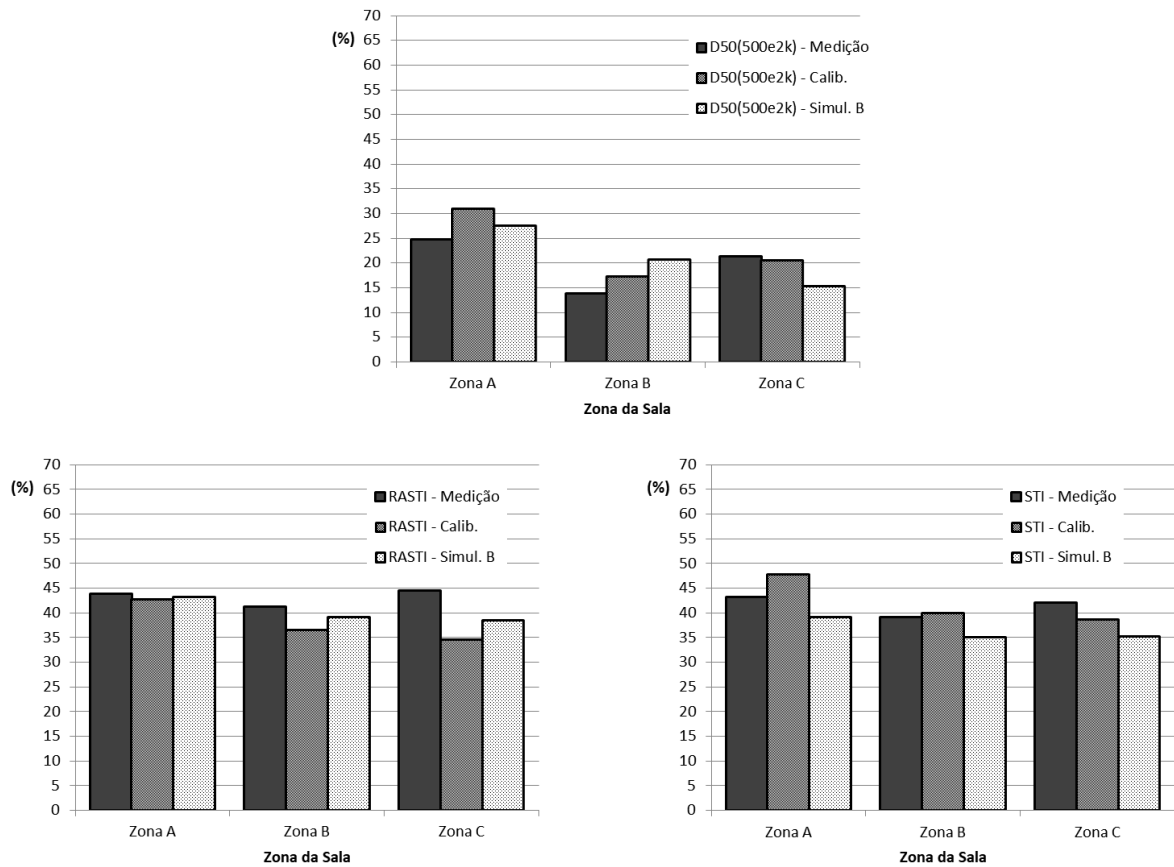


Figura 6.10 – Resultados da simulação B, de D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI

É possível verificar que existe algum impacto nos valores de parâmetros acústicos, nomeadamente com o aumento do tempo de reverberação. O parâmetro STI desceu e D_{50} desceu nas zonas A e C, mas aumentou na zona B.

Na Tabela 6.5 apresentam-se os valores médios de absorção sonora por banda de frequência, dos planos do modelo.

Tabela 6.5 – Valores médios de absorção sonora dos planos do modelo na simulação B.

Banda de Frequência (Hz)	$\alpha_{\text{médio}}$
125	0,06
250	0,08
500	0,09
1000	0,11
2000	0,11
4000	0,11

6.2.4 Simulação C

Na simulação C, o material de revestimento reboco, é substituído pelo sistema Baswaphon. Os coeficientes de absorção sonora deste sistema podem ser consultados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Valores de coeficientes de absorção sonora de sistema Baswaphon

Materiais e condições de montagem	Coeficientes de absorção sonora para as frequências indicadas expressas em Hz.					
	125	250	500	1k	2k	4k
Sistema de lã mineral e acabamento em massa mineral.	0,18	0,37	0,64	0,66	0,60	0,56

Na Tabela 6.7, Figura 6.11 e Figura 6.12, são apresentados os resultados da simulação C. Nos gráficos das figuras, os valores desta simulação são apresentados juntamente com os resultados da simulação B, para efeitos de comparação.

Tabela 6.7 – Resultados da simulação C

Média Espacial			D50 _(500e2k) (%)	RASTI (%)	STI (%)
f (Hz)	T ₃₀ (s)	EDT (s)			
125	3,11	3,17	Zona A	52	59
250	2,01	2,04			
500	1,47	1,40			
1000	1,30	1,15	Zona B	48	57
2000	1,26	1,16	Zona C	34	54
4000	1,13	1,01			

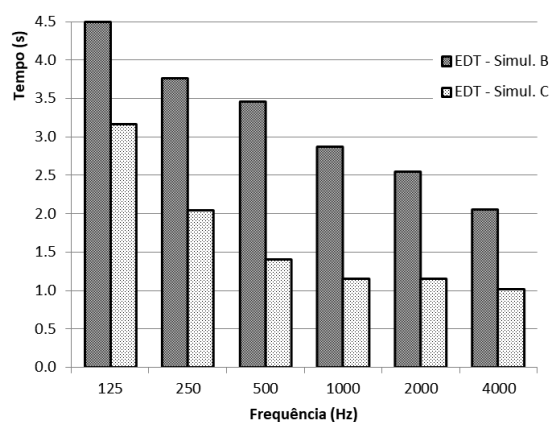
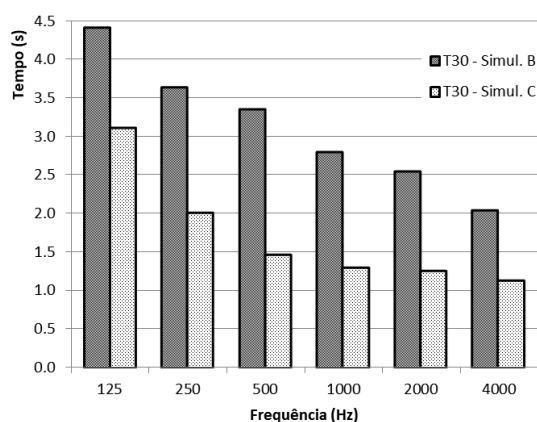


Figura 6.11 – Resultados da simulação C, de TR e EDT

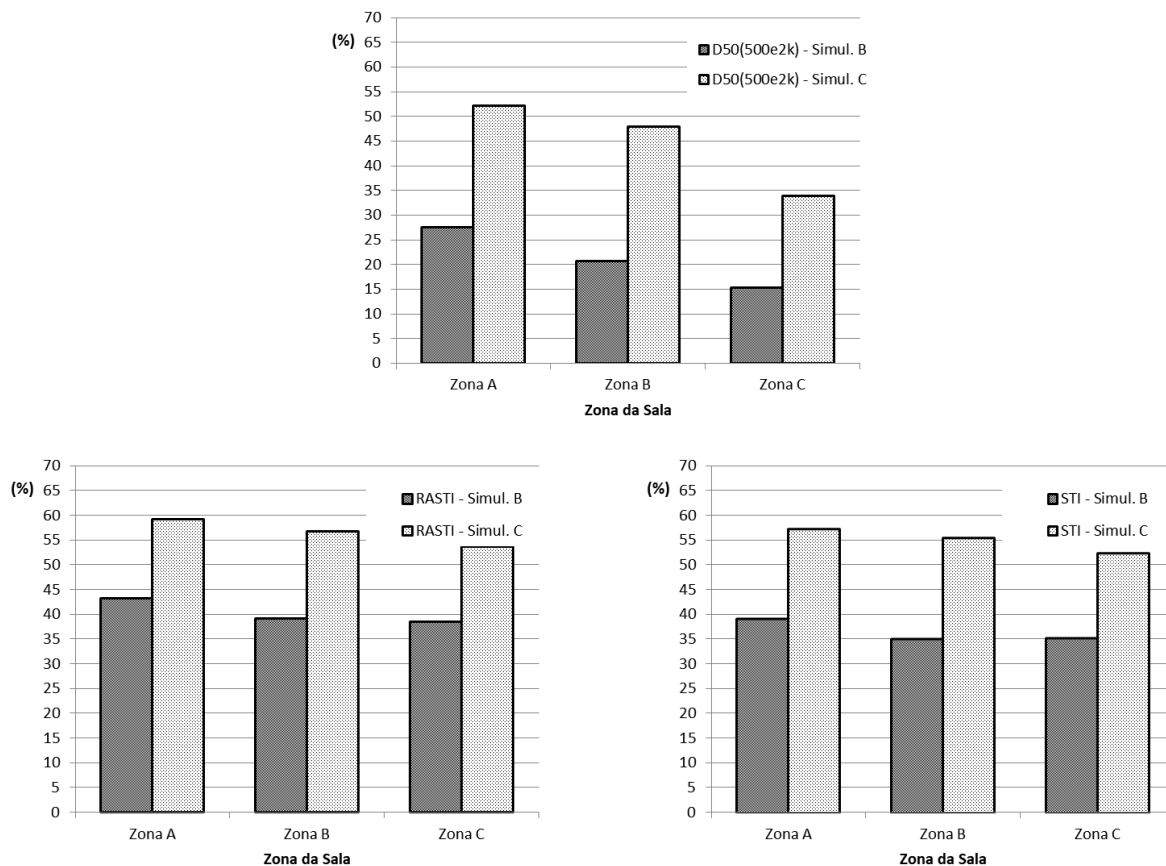


Figura 6.12 – Resultados da simulação C, de D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI

É possível verificar que a substituição de reboco comum existente, por sistema Baswaphon teve um impacto muito grande na redução do tempo de reverberação e com isso um grande impacto no aumento dos parâmetros de definição e inteligibilidade da palavra.

Na Tabela 6.8 apresentam-se os valores médios de absorção sonora por banda de frequência, dos planos do modelo.

Tabela 6.8 – Valores médios de absorção sonora dos planos do modelo na simulação C.

Banda de Frequência (Hz)	$\alpha_{\text{médio}}$
125	0,09
250	0,14
500	0,20
1000	0,22
2000	0,22
4000	0,21

6.2.5 Simulação D

Na simulação D, introduz-se a concha acústica que tem numa face madeira lisa e na outra face um sistema de régua de madeira pintada com 55mm x 20mm, frestas aparentes de 3mm, confinando com caixa-de-ar preenchida com material absorvente sonoro. Os coeficientes de absorção sonora deste sistema podem ser consultados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 – Valores de coeficientes de absorção sonora das faces da concha acústica

Materiais e condições de montagem	Coeficientes de absorção sonora para as frequências indicadas expressas em Hz.					
	125	250	500	1k	2k	4k
Madeira lisa	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Sistema de painéis de régua de madeira pintada 55mm x 20mm, com frestas aparentes 3mm, confinando com caixa-de-ar preenchida com material absorvente sonoro.	0,32	0,82	0,54	0,38	0,28	0,22

Na Tabela 6.10, Figura 6.13 e Figura 6.14, são apresentados os resultados da simulação D. Nos gráficos das figuras, os valores desta simulação são apresentados juntamente com os resultados da simulação C, para efeitos de comparação.

Tabela 6.10 – Resultados da simulação D

f (Hz)	Média Espacial		D50 _(500e2k) (%)	RASTI (%)	STI (%)
	T ₃₀ (s)	EDT (s)			
125	2,86	2,89	Zona A	61	63
250	1,91	1,85			
500	1,36	1,24			
1000	1,27	0,99	Zona B	52	60
2000	1,21	0,95	Zona C	38	57
4000	1,11	0,88			

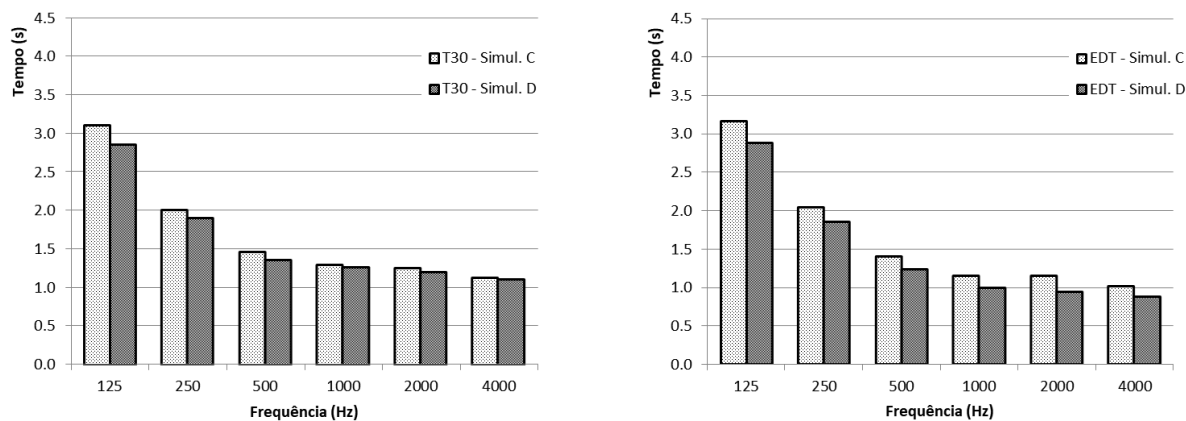


Figura 6.13 – Resultados da simulação D, de TR e EDT

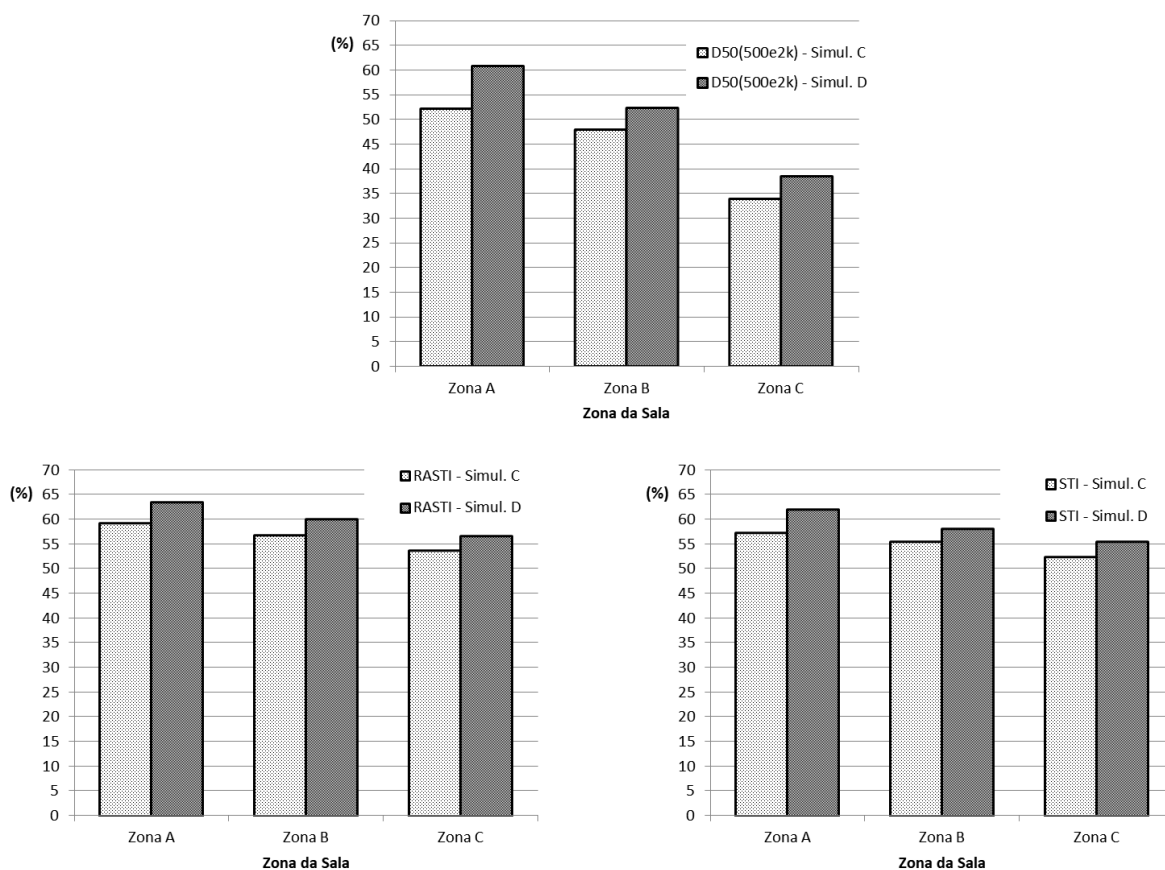


Figura 6.14 – Resultados da simulação D, de D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI

A introdução da concha acústica tem um efeito grande nos parâmetros acústicos, em particular se considerarmos a sua dimensão relativamente à dimensão do auditório. O efeito descrito no Capítulo 6.1.5, da reflexão de uma fracção significativa do som das fontes para a

nave, pode ser verificado no aumento dos parâmetros de definição e inteligibilidade da palavra, em particular na zona A da audiência, que é a que está mais perto das fontes.

A diminuição do tempo de reverberação e ainda mais do EDT, também é de notar. Porém, a razão maior para esta diminuição não é, como se poderia pensar, a introdução da superfície de absorção sonora na face posterior da concha acústica. Na realidade, comparando os coeficientes de absorção sonora médios do modelo do auditório antes e depois da introdução da concha acústica, Tabela 6.8 e Tabela 6.11 respectivamente, reparamos que estes valores são iguais, arredondados à centésima da unidade. A razão da diminuição do tempo de reverberação e do EDT é que a capela-mor é o volume do auditório com menores valores médios de absorção nos revestimentos. Assim, quando o som das fontes é reflectido na concha acústica para a nave, está ao mesmo tempo a ser enviado para volumes do auditório onde será absorvido para níveis baixos, num menor número de reflexões.

Na Tabela 6.11 apresentam-se os valores médios de absorção sonora por banda de frequência, dos planos do modelo.

Tabela 6.11 – Valores médios de absorção sonora dos planos do modelo na simulação D.

Banda de Frequência (Hz)	$\alpha_{\text{médio}}$
125	0,09
250	0,14
500	0,20
1000	0,22
2000	0,22
4000	0,21

6.2.6 Simulação E

Na simulação E, introduzem-se as guardas das capelas laterais. Os materiais de revestimento são os mesmo da concha acústicas e os coeficientes de absorção sonora podem ser consultados na Tabela 6.9.

Na Tabela 6.12, Figura 6.15 e Figura 6.16, são apresentados os resultados da simulação E. Nos gráficos das figuras, os valores desta simulação são apresentados juntamente com os resultados da simulação D, para efeitos de comparação.

Tabela 6.12 – Resultados da simulação E

Média Espacial				D50 _(500e2k) (%)	RASTI (%)	STI (%)
f (Hz)	T ₃₀ (s)	EDT (s)				
125	2,79	2,79	Zona A	60	63	62
250	1,91	1,82	Zona B	53	60	58
500	1,39	1,23	Zona C	37	57	55
1000	1,18	1,00				
2000	1,20	0,92				
4000	1,09	0,85				

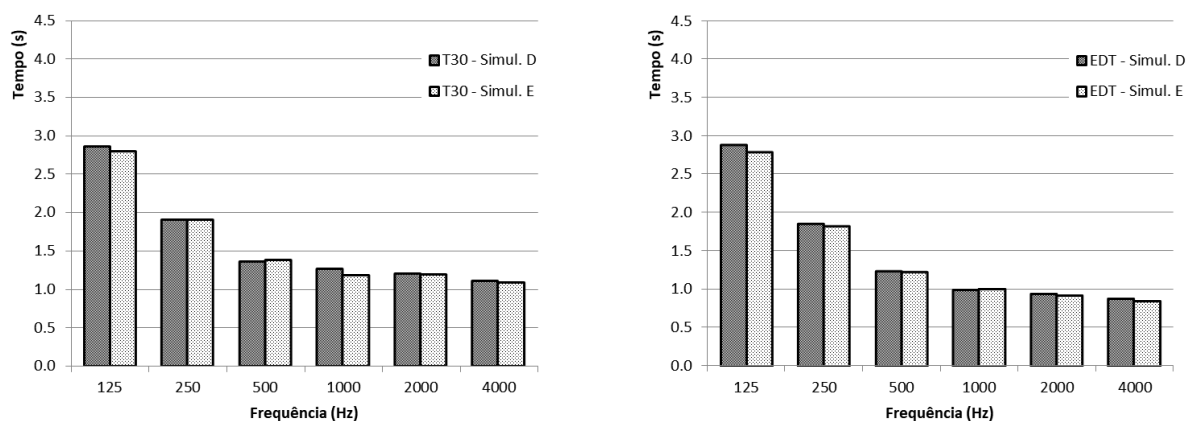


Figura 6.15 – Resultados da simulação E, de TR e EDT

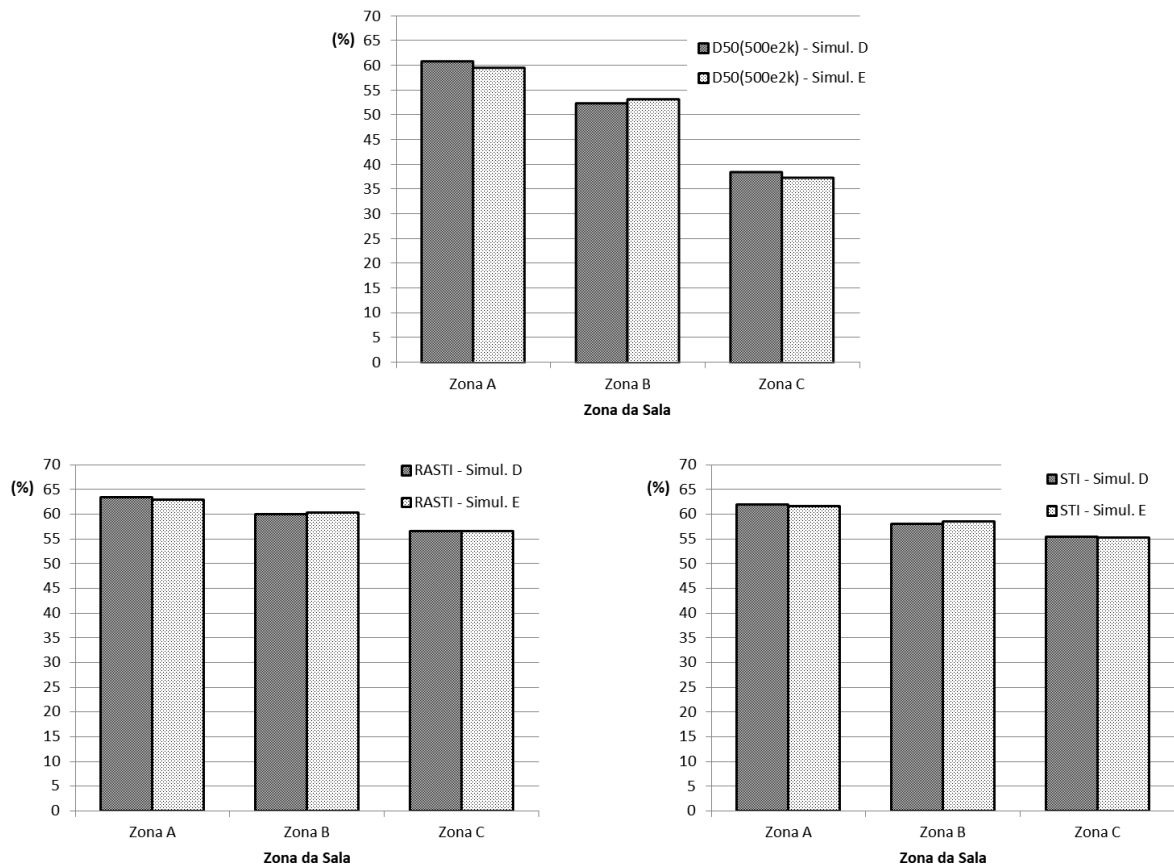


Figura 6.16 – Resultados da simulação E, de D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI

A introdução das guardas nas capelas laterais parece não ter efeito notório em nenhum dos parâmetros acústicos, pelo que a sua eficácia fica posta em causa.

Na Tabela 6.13 apresentam-se os valores médios de absorção sonora por banda de frequência, dos planos do modelo.

Tabela 6.13 – Valores médios de absorção sonora dos planos do modelo na simulação E.

Banda de Frequência (Hz)	$\alpha_{\text{médio}}$
125	0,09
250	0,14
500	0,20
1000	0,22
2000	0,22
4000	0,21

6.2.7 Simulação F

Na simulação F, substituem-se as cadeiras existentes por cadeiras almofadadas no assento e encosto. Os coeficientes de absorção sonora podem ser consultados na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 – Valores de coeficientes de absorção sonora de cadeiras almofadadas vazias

Materiais e condições de montagem	Coeficientes de absorção sonora para as frequências indicadas expressas em Hz.					
	125	250	500	1k	2k	4k
Cadeira almofadada vazia (por m ²)	0,21	0,26	0,32	0,32	0,32	0,26

Na Tabela 6.15, Figura 6.17 e Figura 6.18, são apresentados os resultados da simulação F. Nos gráficos das figuras, os valores desta simulação são apresentados juntamente com os resultados da simulação E, para efeitos de comparação.

Tabela 6.15 – Resultados da simulação F

f (Hz)	Média Espacial		Zona	D50 _(500e2k) (%)	RASTI (%)	STI (%)
	T ₃₀ (s)	EDT (s)				
125	2,60	2,57	A	60	64	62
250	1,78	1,67	B	57	62	61
500	1,35	1,13	C	40	58	56
1000	1,16	0,92				
2000	1,15	0,86				
4000	1,08	0,81				

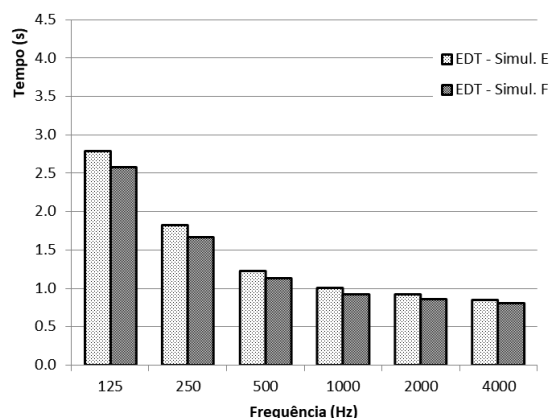
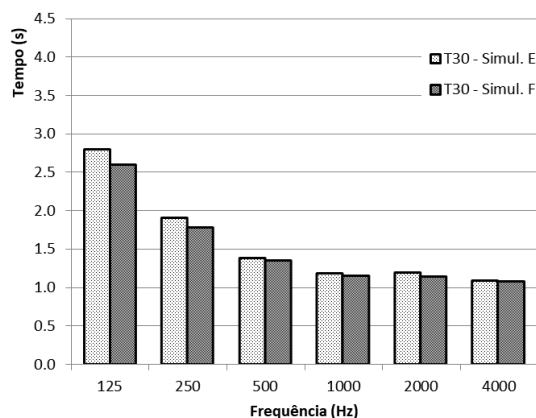


Figura 6.17 – Resultados da simulação F, de TR e EDT

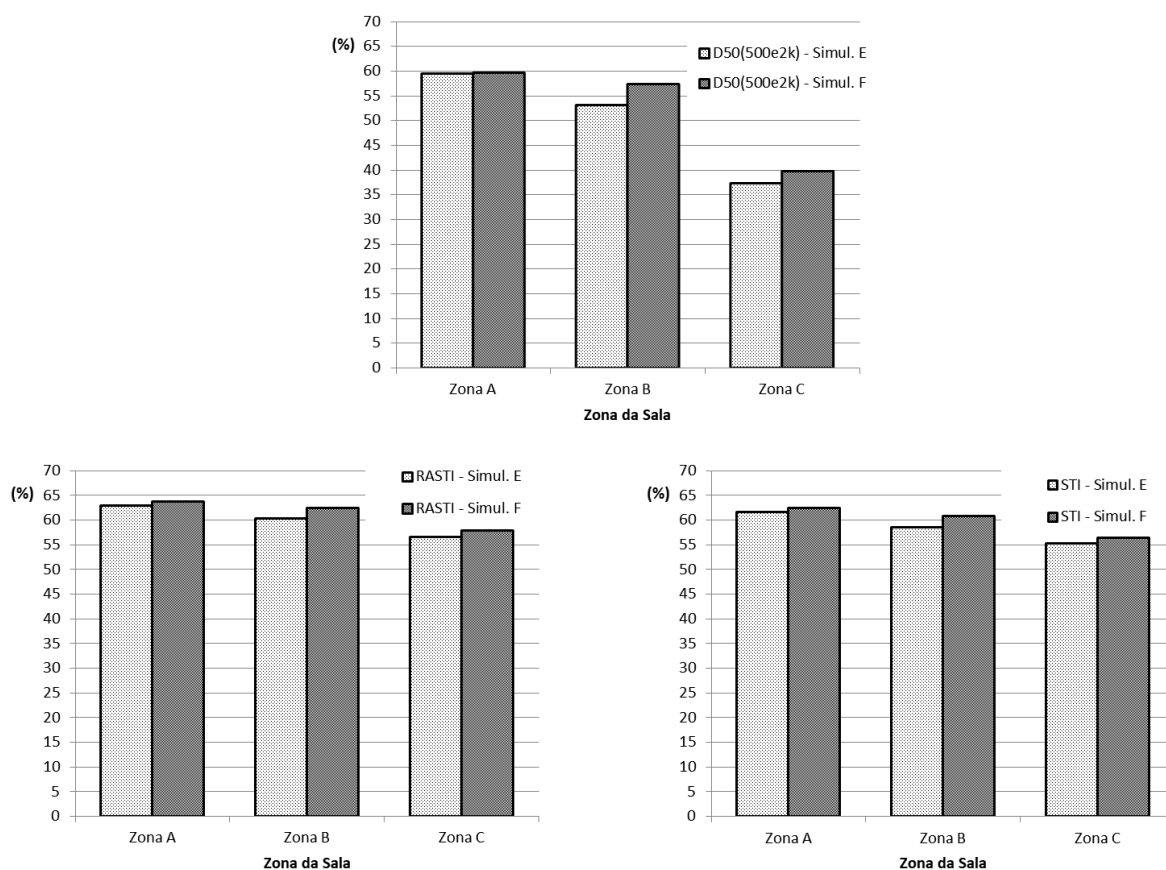


Figura 6.18 – Resultados da simulação F, de D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI

A substituição das cadeiras existentes por cadeiras almofadadas no assento e encosto, trouxe a redução do tempo de reverberação e um aumento geral nos parâmetros de definição e inteligibilidade da palavra, em particular nas zonas B e C onde o campo directo não exerce tanta influência.

Na Tabela 6.16 apresentam-se os valores médios de absorção sonora por banda de frequência, dos planos do modelo.

Tabela 6.16 – Valores médios de absorção sonora dos planos do modelo na simulação F.

Banda de Frequência (Hz)	$\alpha_{\text{médio}}$
125	0,10
250	0,15
500	0,22
1000	0,24
2000	0,23
4000	0,22

6.2.8 Simulação G

Na simulação G, prevê-se a ocupação da totalidade das cadeiras da audiência. Os coeficientes de absorção sonora podem ser consultados na Tabela 6.17.

Tabela 6.17 – Valores de coeficientes de absorção sonora de cadeiras almofadadas vazias

Materiais e condições de montagem	Coeficientes de absorção sonora para as frequências indicadas expressas em Hz.					
	125	250	500	1k	2k	4k
Cadeira almofadada ocupada (por m ²)	0,28	0,33	0,37	0,45	0,49	0,47

Na Tabela 6.18, Figura 6.19 e Figura 6.20, são apresentados os resultados da simulação G. Como indicado no Capítulo 6.2, esta simulação é semelhante à simulação F, agora com ocupação do auditório a 100%. Nos gráficos das figuras, os valores desta simulação são apresentados juntamente com os resultados da simulação F, para efeitos de comparação.

Tabela 6.18 – Resultados da simulação G

f (Hz)	Média Espacial		D50 _(500e2k) (%)	RASTI (%)	STI (%)
	T ₃₀ (s)	EDT (s)			
125	2,54	2,49	61	65	63
250	1,76	1,64			
500	1,37	1,09			
1000	1,16	0,86	60	63	62
2000	1,16	0,81			
4000	1,04	0,76	42	58	57

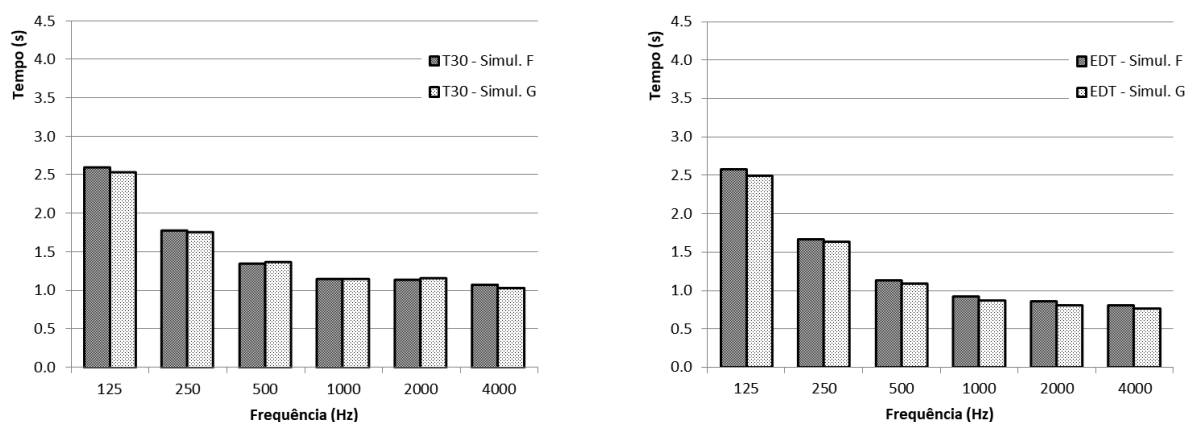


Figura 6.19 – Resultados da simulação G, de TR e EDT

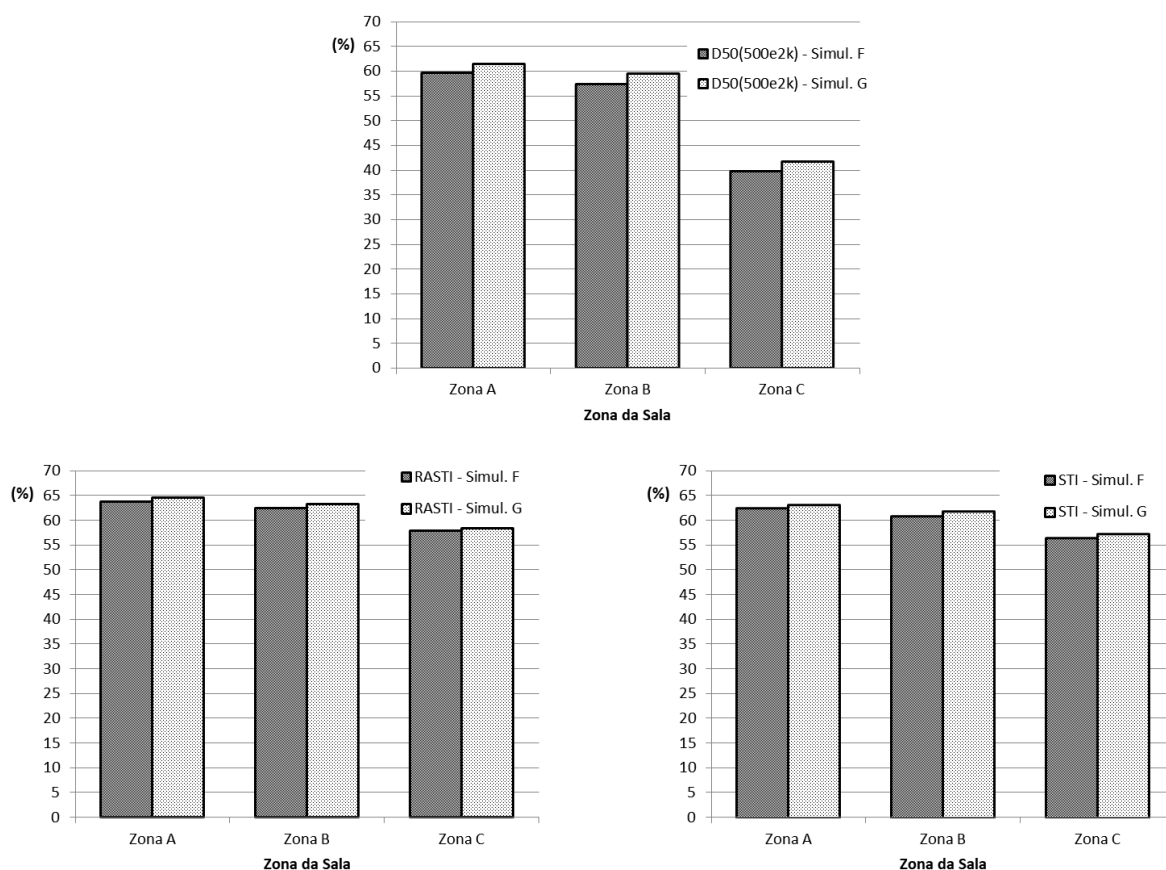


Figura 6.20 – Resultados da simulação G, de D_{50} (500Hz, 2kHz), RASTI e STI

A total ocupação das cadeiras do auditório trouxe uma melhoria geral nos parâmetros com acústicos, com alguma redução do tempo de reverberação e um aumento geral nos parâmetros de definição e inteligibilidade da palavra.

Na Tabela 6.19 apresentam-se os valores médios de absorção sonora por banda de frequência, dos planos do modelo.

Tabela 6.19 – Valores médios de absorção sonora dos planos do modelo na simulação G.

Banda de Frequência (Hz)	$\alpha_{\text{médio}}$
125	0,10
250	0,16
500	0,22
1000	0,25
2000	0,24
4000	0,23

6.2.9 Evolução de valores de parâmetros pelas simulações

Uma vez que nas simulações as estratégias foram sendo implementadas cumulativamente, é possível apresentar gráficos da evolução dos valores dos parâmetros acústicos ao longo das mesmas.

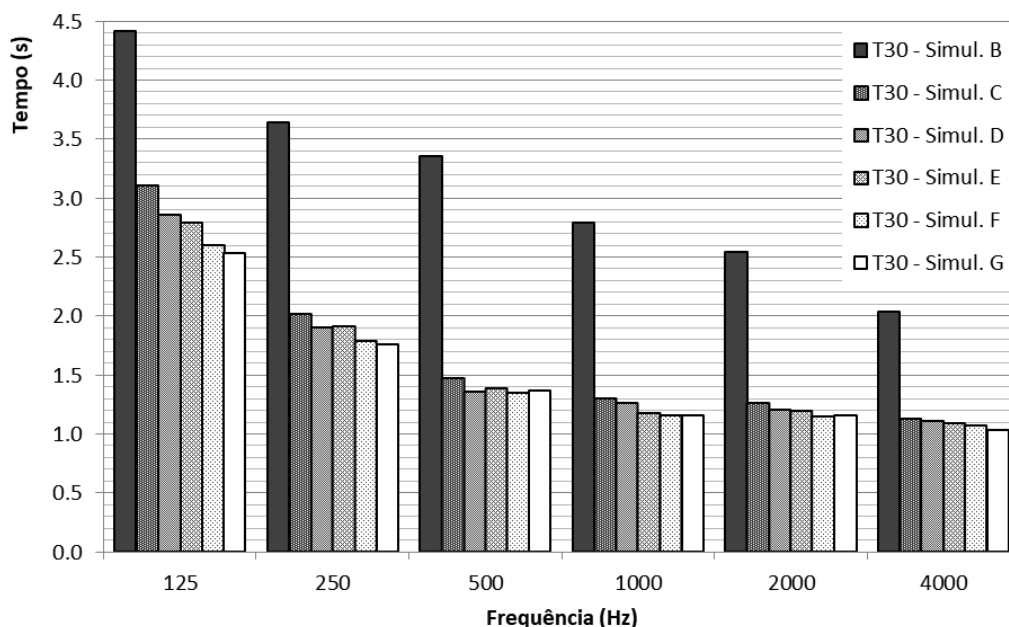


Figura 6.21 – Evolução de T_{30} na implementação de estratégias

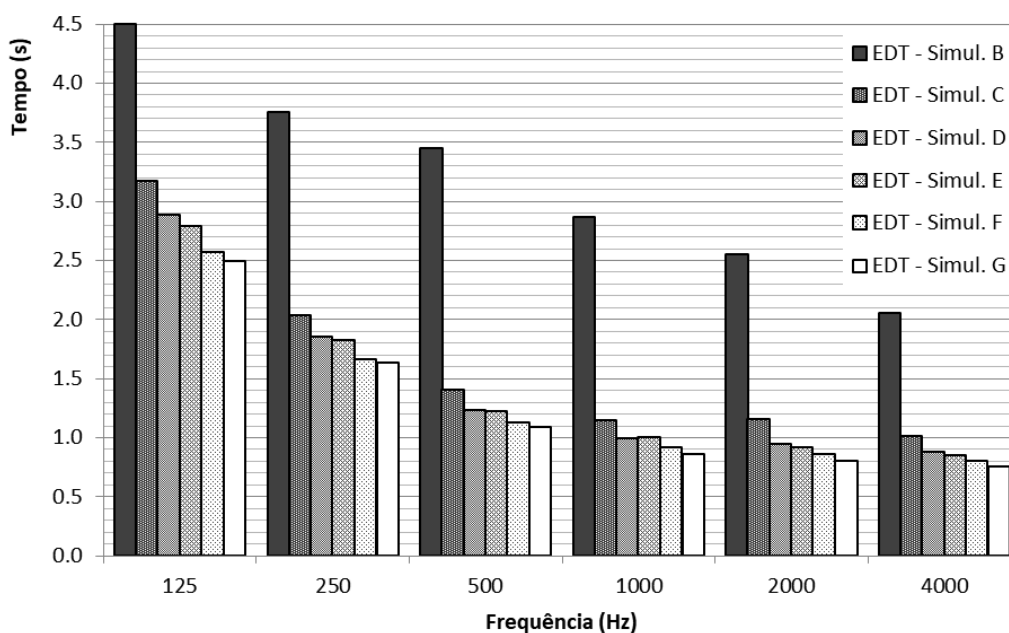


Figura 6.22 – Evolução de EDT na implementação de estratégias

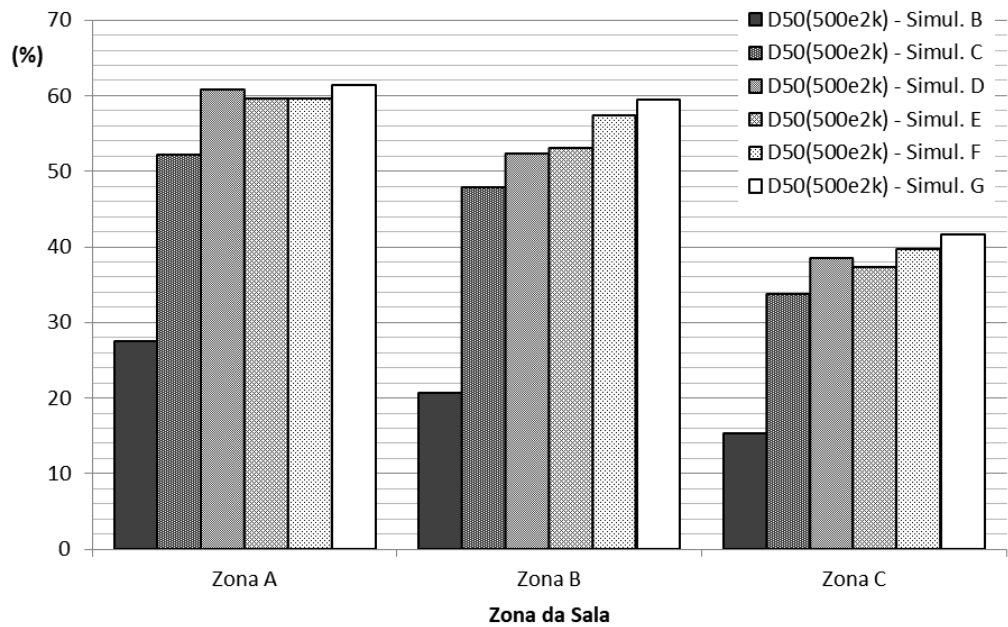


Figura 6.23 – Evolução de D_{50} na implementação de estratégias

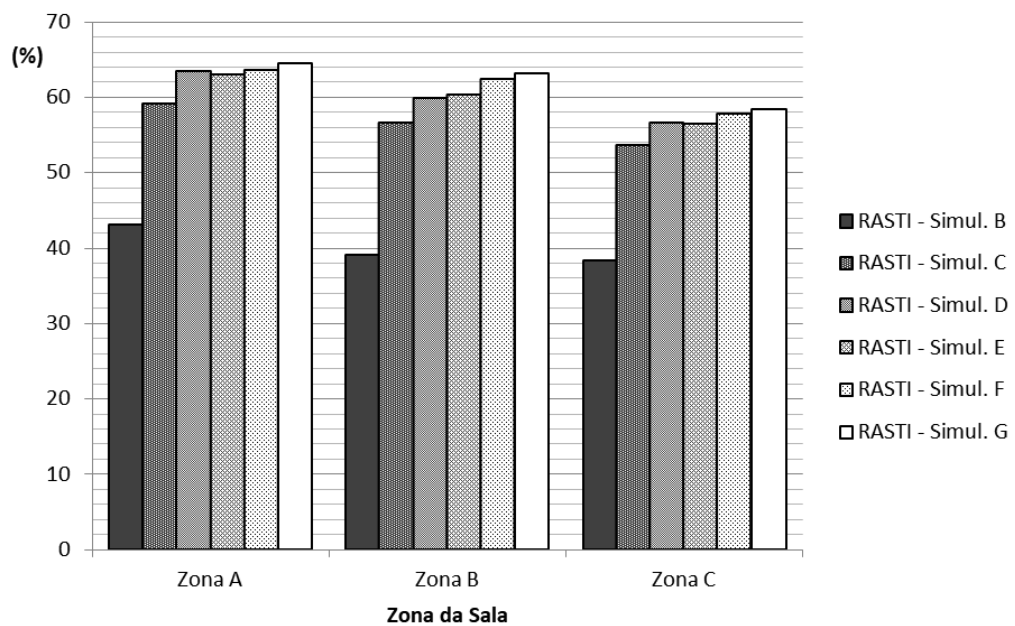


Figura 6.24 – Evolução de RASTI na implementação de estratégias

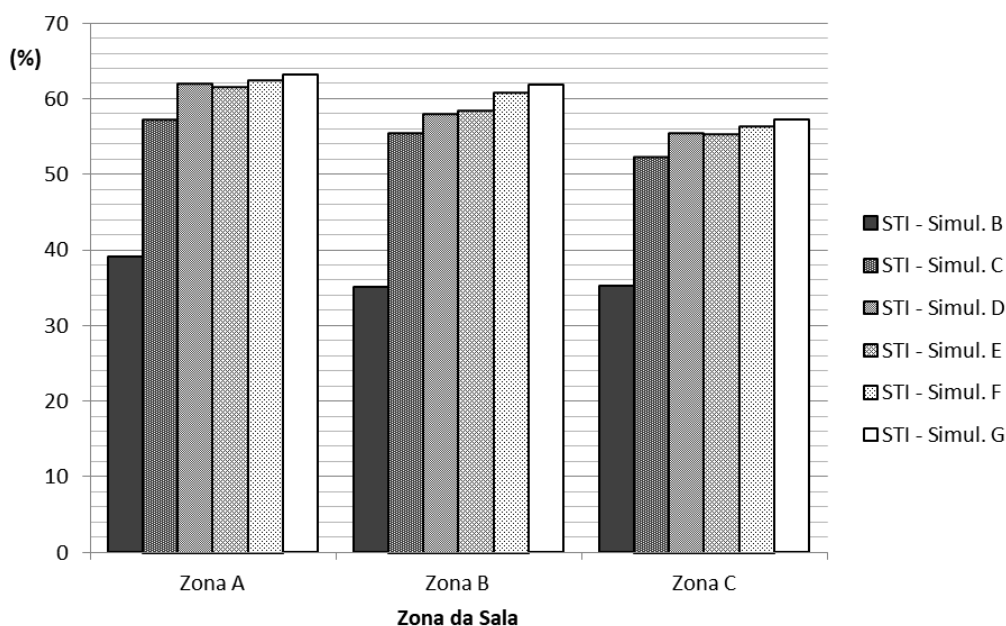


Figura 6.25 – Evolução de STI na implementação de estratégias

6.3 Comparação com objectivos acústicos

Neste capítulo comparam-se os resultados da implementação de todas as estratégias com os valores dos objectivos acústicos definidos no Capítulo 3.5.

6.3.1 Tempo de reverberação (TR)

No Capítulo 3.5.1 foram apresentados 3 diferentes gamas de valores recomendados por 3 diferentes autores.

Para Antoni Carrión Isbert, a média de valores de tempo de reverberação de 500 Hz e 1000 Hz, TR_{mid} calculado pela expressão (3.1), deve situar-se entre 0,98 s e 1,18 s para uma sala totalmente ocupada. Assim, usam-se para este cálculo os valores de T_{30} da simulação G (Capítulo 6.2.8).

$$TR_{mid} = \frac{1,37 + 1,16}{2} \approx 1,27 \text{ s} \quad (6.1)$$

Segundo o critério de Isbert, existe ainda um ligeiro excesso de tempo de reverberação.

Para Marshall Long, o mesmo parâmetro TR_{mid} deve estar compreendido na gama de valores de 1,12 s a 1,18 s, mas para salas vazias (simulação F). Este autor recomenda ainda que para a função de palavra, o valor de tempo de reverberação seja semelhante no espectro de frequências estudado.

$$TR_{mid} = \frac{1,35 + 1,16}{2} \approx 1,26 \text{ s} \quad (6.2)$$

Também neste caso, o resultado da simulação é ligeiramente superior ao recomendado pelo autor. Relativamente à recomendação de valor semelhantes a TR_{mid} no espectro estudado, podemos ver na Tabela 6.12 que tal é cumprido nas bandas de 1 kHz, 2 kHz e 4 kHz. Na banda de 500 Hz é ligeiramente excessivo, mas nas bandas de 125 Hz e 250 Hz, não se cumpre.

Finalmente, para Higini Arau-Puchades a gama de frequências recomendada para TR_{mid} é entre 0,81 s e 1,24 s para a sala vazia.

O valor de TR_{mid} da simulação já foi acima calculado na expressão (6.2) e é 1,26 s.

Neste caso e dada a proximidade de valores, pode considerar-se que o valor de TR_{mid} da simulação cumpre o valor máximo recomendado por este autor.

6.3.2 Early Decay Time (EDT)

Os objectivos acústicos para este parâmetro são de um valor de 60% a 75% do valor do tempo de reverberação, não especificando se se aplica a sala vazia (simulação F) ou ocupada (simulação G), o que no caso de estudo faz alguma diferença.

A Tabela 6.20 apresenta o rácio EDT/TR e como se pode ver, os valores recomendados são cumpridos nas bandas de frequências de 2 kHz e 4 kHz no caso da sala vazia e nas bandas de 1 kHz a 4 kHz no caso da sala ocupada.

Tabela 6.20 – Rácio EDT / TR

f (Hz)	EDT / TR	
	Simulação F (%)	Simulação G (%)
125	99	98
250	94	93
500	83	79
1000	79	75
2000	75	70
4000	75	73

6.3.3 Definição da palavra (D_{50})

Para o parâmetro D_{50} , Isbert recomenda que o valor seja superior a 50% em todas as bandas de frequências, para uma sala ocupada.

Os valores de D_{50} da simulação G são apresentados na Tabela 6.21. Nela se pode verificar que o parâmetro cumpre a recomendação nas bandas de 500 Hz a 4000 Hz nas zonas A e B, mas não nas restantes zonas.

Tabela 6.21 – Valores médios de absorção sonora dos planos do modelo na simulação G.

f (Hz)	D_{50}		
	Zona A (%)	Zona B (%)	Zona C (%)
125	34	27	19
250	42	39	24
500	56	54	37
1000	64	64	40
2000	66	65	46
4000	69	66	48

Importa lembrar que as bandas de frequência mais relevantes para a palavra, são 500 Hz e 2000 Hz, e para estas o parâmetro cumpre nas zonas A e B, mas não na zona C.

6.3.4 Inteligibilidade da palavra (STI / RASTI)

Para os parâmetros de inteligibilidade, Isbert recomenda que o valor seja superior a 65%, para uma sala ocupada.

Na Tabela 6.18 podemos ler os valores de RASTI e STI e notar que nas zona A e B os valores atingem ou ficam muito próximos do valor recomendado.

7 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A reabilitação acústica de um edifício de valor histórico traz desafios adicionais às de um edifício comum, devido às limitações de intervenção no espaço. Estas limitações são no contexto da preservação arquitectónica, quer em termos de forma quer em termos da materialização.

Os objectivos principais desta dissertação foram: estabelecer procedimentos de análise do campo sonoro e de identificação de problemas acústicos presentes; identificar objectivos de qualidade acústica; identificar as limitações na procura de soluções; e definir, materializar e testar estratégias para as soluções de reabilitação acústica a adoptar.

O caso de estudo escolhido para esta dissertação foi exigente na prossecução destes objectivos, sendo uma igreja de meados do séc. XVII reabilitada para a nova função de auditório, apresentando uma geometria complexa com vários volumes, tectos altos e em arcos côncavos, audiência em dois planos diferentes, volumetria elevada, ausência de elementos decorativos e mobiliário minimalista.

Limitações na Procura de Soluções

Os novos revestimentos ou elementos a introduzir deverão respeitar a arquitectura histórica bem como a arquitectura da reabilitação.

Os revestimentos das superfícies do edificado e outras instalações permanentes, devem ter uma aparência contemporânea à data de construção (ou última grande intervenção histórica se for aplicável), mesmo que por trás desses revestimentos existam sistemas ou tecnologias modernas.

Ainda assim, nos edifícios de valor histórico é comumente aceite a introdução de alguns elementos anacrónicos, em particular mobiliário e elementos decorativos. No mobiliário, no caso de estudo, propõe-se alterar o tipo de cadeiras e introduzir um elemento móvel, uma concha acústica.

Definição e Avaliação de Estratégias

A definição de estratégias deve começar pela definição de uma estratégia geral, elaborada de um ponto de vista holístico.

Um dos passos importantes para o desenvolvimento da estratégia geral, é a análise e estudo da distribuição dos coeficientes de absorção sonora dos revestimentos nos volumes do espaço em estudo e o entendimento das consequências dessa distribuição nos vários parâmetros que são indicadores da qualidade acústica.

No caso de estudo, foi importante desde logo controlar o tempo de reverberação antes de avançar com medidas de melhoria em zonas específicas. As obras de reabilitação já introduziram materiais com forte absorção acústica, mas absorção adicional é necessária para baixar o tempo de reverberação e criar condições para os parâmetros D_{50} e RASTI/STI.

A introdução da concha acústica demonstrou resultado particularmente interessantes, considerando a sua dimensão relativamente à volumetria do auditório. Com a concha e sem aumento visível dos coeficientes de absorção médios do auditório, foi possível reduzir ao tempo de reverberação do auditório ao impedir uma fracção importante da energia sonora de se dirigir à capela-mor, onde os coeficientes de absorção médios são mais baixos. Ao reflectir o som junto das fontes, conseguiu-se ainda que essa fracção de energia chegasse à audiência sem atrasos significativos, reforçando assim a definição e inteligibilidade da palavra.

A geometria da concha acústica poderá ser ainda mais refinada para aumentar a eficiência da mesma.

A introdução das guardas das capelas laterais foi um caso de pouco sucesso, talvez pela pequena dimensão.

A substituição das cadeiras existentes por cadeiras almofadadas no assento e no encosto, trouxe absorção adicional e permitiu atingir alguns dos objectivos acústicos.

Teste das Soluções

Na fase de construção do modelo numérico, durante o processo de simplificação das geometrias, deve ser tida em consideração a dimensão do erro que se introduz no volume do espaço e a sua influência no tempo de reverberação.

O facto de ter sido dado algum detalhe geométrico ao modelo numérico, poderá ser um dos factores principais para que a primeira simulação para calibração tenha sido bem sucedida,

com resultados já próximos dos valores de medição. Isto ocorreu em cada uma das bandas de frequência, não só no tempo de reverberação como noutros parâmetros acústicos.

Durante a calibração do modelo numérico e para este caso de estudo, a consideração da premissa de Beranek apresentada e discutida nos Capítulos 2.2 e 5.3, resultou positivamente. A calibração do modelo numérico apontou para valores de coeficiente de absorção do sistema de revestimento acústico aplicado no local, próximos dos valores dados pelo fabricante depois de ajustados para aplicação na fórmula de Eyring para cálculo do tempo de reverberação, pela expressão (5.3).

Desenvolvimentos Futuros

O tema abordado neste trabalho pode ser adicionalmente desenvolvido com a análise de novos casos de estudo, o que permitirá enriquecer e avolumar a quantidade e tipo de soluções, e em consequência disso partir para o desenvolvimento de uma caracterização e categorização de estratégias de correcção acústica no panorama de edifícios de valor histórico.

Neste sentido, foi ainda apresentado neste trabalho o resultado das medições acústicas realizadas na Sala dos Capelos (Cap. 4.3 e Anexo 1), com o intuito de os disponibilizar à academia e comunidade científica, para o desenvolvimento de novos trabalhos neste histórico e nobre espaço.

No caso de estudo do presente trabalho, uma das questões que não ficou resolvida foi o excessivo tempo de reverberação nas bandas de frequência de 125 Hz e 250 Hz.

Para conseguir resolver esta questão sem ser usando elementos activos, há um campo de investigação recente que pode trazer soluções de absorção de frequências na gama dos graves, com elementos que ocupam pouco volume.

Trata-se de caixas rígidas com uma frente com 2 painéis paralelos mas separados, que funcionam como diafragma. No interior existe um volume preenchido com carvão activado granular, onde ocorrem fenómenos de adsorção e dessorção do ar nas superfícies do carvão, dificultando assim a propagação da energia. Este efeito ocorre essencialmente na gama baixa das frequências audíveis [16].

Dada a potencialidade desta tecnologia, estas caixas não ocupariam grande volume e poderiam ser introduzidas no caso de estudo sem grande impacto visual, integrando-se no mobiliário e equipamentos existentes.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Antoni Carrión Isbert (1998). “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona
- [2] António Tadeu, Diogo Mateus, Julieta António, Luís Godinho, Paulo Amado Mendes (2010). “Sebenta de Acústica Aplicada”. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra
- [3] Marshall Long (2006). “Architectural Acoustics”. Elsevier Academic Press,
- [4] Beranek, Leo L. (2007). “Aspects of Concert Hall Acoustics”. 123rd Audio Engineering Society Convention, New York
- [5] Michael Barron (2010). “Auditorium Acoustics and Architectural Design (2nd Edition)”. Spon Press, Nova Iorque
- [6] Trevor J. Cox, Peter D’Antonio (2004). “Acoustic Absorbers and Diffusers”. Spon Press, Nova Iorque
- [7] João Miguel Figueiredo Silva (2013). “A In-Temporalidade da Arquitectura - O Colégio da SS. Trindade”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitectura da Universidade de Coimbra, Coimbra
- [8] Diogo Mateus (2017). “Apontamento das Aulas de AAPAEF - MEAECS”. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra
- [9] Luís Godinho, Paulo Mendes, Andreia Pereira, Diogo Mateus (2017). “Curso de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética na Construção Sustentável - FCTUC”. Apontamentos de aulas, Coimbra
- [10] Universidade de Coimbra. Disponível em: www.uc.pt/informacaopara/visit/paco/capelos. Acedida a 26 de Fevereiro de 2018
- [11] Magne Skålevik (2011). “Schroeder Frequency Revisited”. Forum Acusticum 2011, Aalborg, Denmark

- [12] John Storyk (2017). Webinar: “Studio Architecture and Acoustics”. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=pmEzMYymnyw>. Acedida em Janeiro 2018, Winter Park, Florida
- [13] D. Espinosa; T. Zamarreño; S. Girón (2010). “Virtual acoustics of the chapel of the former Mora Hospital”. *Internoise 2010*, Lisboa
- [14] Cyril M. Harris (1967). “Absorption of Sound in Air Versus Humidity and Temperature”. National Aeronautics and Space Administration, New York
- [15] Rindel, Jens Holger (2010). “Room Acoustics Prediction Modelling”. XXIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, Salvador Baía
- [16] Bechwati, F, Avis, MR, Bull, DJ, Cox, TJ, Hargreaves, JA, Moser, D, Ross, DK, Umnova, O and Venegas, RG (2012). “Low frequency sound propagation in activated carbon”. *J. Acoust. Soc. Am.* 132 (1), July 2012, pp.239-248, AIP Publishing, USA

OUTRA BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- [17] Henrik Möller (2016). “Challenges of design of smaller multi-purpose halls”. *EuroRegio 2016*, Porto
- [18] Lukas Aspöck, Michael Vorländer (2016). “Room geometry acquisition and processing methods for geometrical acoustics simulation models”. *EuroRegio 2016*, Porto
- [19] Paweł Małecki (2016). “Acoustics desired for choral music - using virtual acoustics and MDS methods”. *EuroRegio 2016*, Porto
- [20] Francesco Martellotta, Teófilo Zamarreño, Sara Girón (2016). “Virtual reconstruction of Spanish Cathedrals: the sound of choir and other weakly coupled volumes in Seville Cathedral”. *EuroRegio 2016*, Porto
- [21] Planells, Ana; Segura, Jaume; Cerdá, Salvador; Barba, Arturo; Cibrián, Rosa; Giménez, Alicia (2016). “¿Son válidos los coeficientes de absorción normalizados en la simulación acústica de edificios patrimoniales?”. *EuroRegio 2016*, Porto
- [22] Adam Pilch (2016). “Optimization in the validation of the room acoustic model”. *EuroRegio 2016*, Porto
- [23] Bruce C. Olson, Ana M. Jaramillo (2016). “Measurements for simulation of speech intelligibility in spaces with conflicting requirements”. *ICA 2016*, Buenos Aires

- [24] Fernando del Solar Dorrego, Pablo Gardella (2016). “Acoustical redesign of “Nuestra Señora de la Paz”“. ICA 2016, Buenos Aires
- [25] Ana Planells, Jaume Segura, Arturo Barba, Salvador Cerdá, Rosa Cibrián, Alicia Giménez (2016). “Analysis of acoustic variations due to different use configurations in the “Basilica de Santa María de Elche”, venue of the “Misteri”“. ICA 2016, Buenos Aires
- [26] Alexander Fadeev, Nikolay Kanev, Anatoly Livshits, Andrey Nechaev, Anton Peretokin, Eugeny Pimenov, Vitaly Rodenkov, Natalia Shirgina (2016). “Acoustics of new and renovated chamber music halls in Russia”. ICA 2016, Buenos Aires
- [27] Rafaella Estevão da Rocha, Stelamaris Rolla Bertoli, Alexandre Virginelli Maiorino (2016). “Reducing geometry or detailing it? Comparison between measured and modeled microscale urban spaces”. ICA 2016, Buenos Aires
- [28] David S. Woolworth (2016). “Case studies of concave rooms for speech and music: Measurement and design”. ICA 2016, Buenos Aires
- [29] Federico Miyara, Vivian Pasch, Ernesto Accolti (2016). “Analysis of lightweight acoustic reflectors”. ICA 2016, Buenos Aires
- [30] Cinzia Buratti, Irene Costarelli, Lucia Susta (2005). “Acoustics Design of S.Tomasso Ex-Monastery Church”. ICSV12 (2005), Lisboa
- [31] A. Magrini - P.Ricciardi (2005). “Dome’s Effect on the Acoustic Field in a Central Plan Church: Measurement and Simulation”. ICSV12 (2005), Lisboa
- [32] Suárez, R.; Sendra, J.J.; Navarro, J.; León, A.L. (2005). “Baroque church acoustics: the example of San Pedro church in Priego (Córdoba)”. ICSV12 (2005), Lisboa
- [33] Rodrigo Tomaz and Luis Conde Santos (2005). “Room Acoustic Modelling Validation: A Multipurpose Hall Case Study”. ICSV12 (2005), Lisboa
- [34] Janko Vodopija, Sinisa Fajt, Miljenko Krhen (2010). “Assessment of acoustic properties of churches”. Internoise 2010, Lisboa
- [35] Attila B. Nagy; András Kotschy; Anders Chr. Gade; Hallur Johannessen (2010). “Room acoustical modelling differences and their consequences”. Internoise 2010, Lisboa
- [36] Arianna Astolfi, Pasquale Bottalico, Daniele Guglielmino (2010). “Acoustics of the teatro regio in turin before and after the refurbishment”. Internoise 2010, Lisboa
-

- [37] Dragana S. Sumarac Pavlovic, Miomir M. Mijic (2010). “Uncertainties in prediction of acoustic response in orthodox church buildings”. *Internoise 2010*, Lisboa
- [38] Radu Lacatis, Radha Montell, Alicia Giménez, Arturo Barba, Rosa Cibrián, Salvador Cerdá, Jaime Segura, José Romero (2010). “Coordination between in situ measures, acoustic simulation and virtual environments, key for improvement proposals in audience halls”. *Internoise 2010*, Lisboa
- [39] Rico, B, León, A.L., Zamarreño, T., Sendra, J.J., Alario, R. Navarro, J. y Díaz, C. (2010). “The acoustic rehabilitation of the Renaissance church of La Anunciación in Seville”. *Internoise 2010*, Lisboa
- [40] Gabriel Mello Silva, Alexandre Virginelli Maiorino, Stelamaris Rolla Bertoli (2016). “Study of energy acoustical parameters at audience area in a simulated multi-purpose hall with an articulated orchestra shell”. *ISMRA 2016*, Buenos Aires
- [41] Roberta Smiderle, Alexandre Maiorino, Rafaella Estevão da Rocha (2016). “The choice of architectural materials and its influence in the acoustical performance of an opera house”. *ISMRA 2016*, Buenos Aires
- [42] Martijn L.S. Vercammen (2010). “Reflection of sound by concave surfaces”. *ICA 2010*, Sydney
- [43] Francesco Martellotta, Ettore Cirillo, Antonio Carbonari, Paola Ricciardi (2009). “Guidelines for acoustical measurements in churches”. *Applied Acoustics 70* (2009) pp.378-388, Elsevier, UK
- [44] Victor Desarnaulds, António P. O. Carvalho (2001). “Analysis of Reverberation Time Values in Churches According to Country and Architectural Styles”. *ICA 2001*, Hong Kong
- [45] Yoshiharu Soeta, Ken Ito, Ryota Shimokura, Tomohiro Ohsawa, Shinichi Sato and Yoichi Ando (2010). “Effects of sound source direction on acoustical parameters in a church”. *ICA 2010*, Sydney
- [46] Bengt-Inge Dalenbäck (2017). “CATT-Acoustic v9.1 - Introduction Manual”. CATT, Gothenburg
- [47] Diogo Mateus (2012). “Requalificação do Cineteatro Alba – Estudo de condicionamento acústico e avaliação experimental após conclusão das obras”. *Congresso Construção 2012*, Coimbra”
-

ANEXO 1- CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DA SALA DOS CAPELOS

A1.1 Medições objectivas da acústica do caso de estudo

No dia 27/12/2017 durante o período da manhã, foram realizadas medições acústicas na Sala dos Capelos, de acordo com a norma ISO 3382-1, para se proceder à sua caracterização.

As medições foram realizadas com a sala desocupada. A sala tem 14 janelas, sendo 9 para espaços interiores. 8 dessas 9 janelas da sala, estiveram abertas durante a medição.

A1.1.1 Equipamento

Para efectuar as medições acústicas, utilizaram-se os seguintes equipamentos:

- analisador portátil, de dois canais, modelo Symphonie, da marca 01dB, ligado a PC portátil;
- microfone modelo 40AF, com pré-amplificador do tipo 26AK, da marca “GRAS – Sound & Vibration” e calibrador de microfone, modelo CAL da marca 01dB;
- fonte sonora omnidirecional normalizada de sons aéreos (dodecaédrica), modelo DO 12, da marca 01dB;
- amplificador, modelo M700, com 600W de potência da marca 01dB;
- gerador de ruído modelo RG-10 da marca 01dB.

O ruído de teste utilizado nestes ensaios foi gerado através da técnica de correlação “sequências de comprimento máximo” (maximum length sequences – MLS).

A1.1.2 Características do ar (meio de propagação)

Foram medidos os valores de Temperatura, 14,8 °C e de Humidade Relativa, 59%, recolhidos durante as medições acústicas efectuadas.

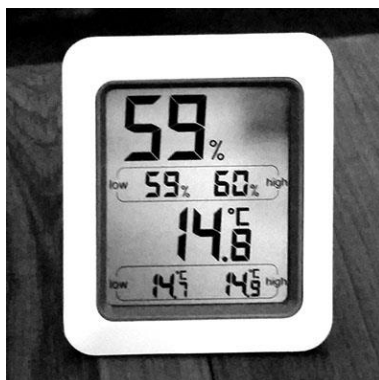


Figura A1.1 – Medição de Temperatura e Humidade Relativa

A1.1.3 Posições de Fontes e de Receptores

A fonte foi colocada na posição da mesa do aluno e foram escolhidas 6 posições de receptor, 1 no júri e 5 representativas da audiência. Em cada par Fonte-Receptor, foram tomadas 3 leituras.

A Figura A1.2 apresenta a localização da fonte e dos 6 receptores.

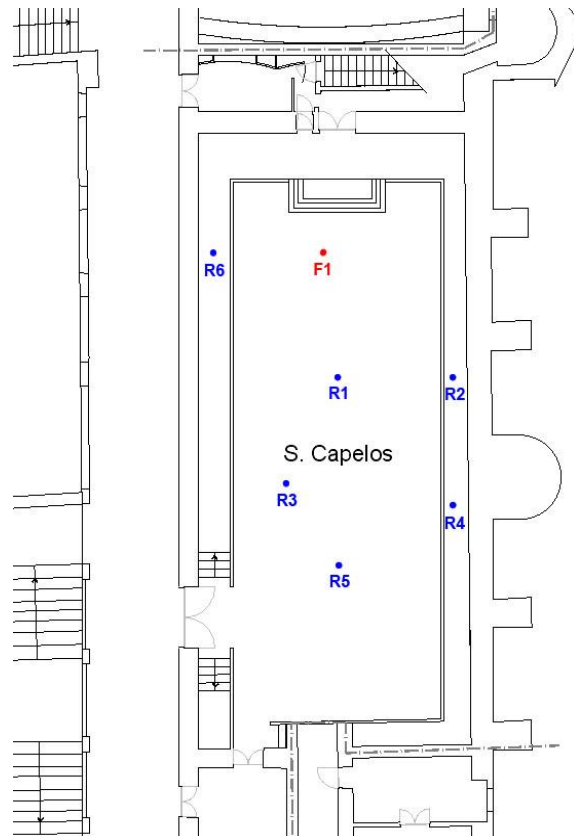


Figura A1.2 – Planta do auditório com marcação das posições das 2 fontes e dos 7 receptores adoptados na medição acústica



Figura A1.3 – Panorâmica da Sala dos Capelos, com Fonte na posição F1 e Receptor na posição R4



Figura A1.4 – Panorâmica da Sala dos Capelos

A1.2 Resultados das medições

A1.2.1 Resultados do parâmetro T_{30}

As Tabelas A1.1 e A1.2 apresentam os valores médios das leituras de T_{30} em cada par Fonte-Receptor.

Tabela A1.1 – Valores médios de T_{30} por receptor, para a fonte F1

f	Fonte F1					
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
(Hz)	(s)	(s)	(s)	(s)	(s)	(s)
125	1,81	1,95	1,48	1,84	1,46	1,72
250	1,78	1,75	1,76	2,16	1,43	1,70
500	1,85	1,75	1,69	1,95	1,83	1,66
1000	1,63	1,74	1,71	1,72	1,64	1,69
2000	1,59	1,60	1,62	1,69	1,68	1,68
4000	1,41	1,38	1,39	1,43	1,42	1,40

A Tabela A1.2 seguinte, apresenta os valores da média espacial do parâmetro T_{30} , o desvio padrão, e também a repetibilidade $\sigma(T_{30})$. Estes valores foram calculados de acordo com os capítulos 8 e 7.2 da norma ISO 3382-1.

Tabela A1.2 – Média espacial de T_{30} , desvio padrão e repetibilidade $\sigma(T_{30})$

f	T_{30} Média Espacial	Desvio Padrão	$\sigma(T_{30})$ Repetibilidade
(Hz)	(s)	(s)	(s)
125	1,71	0,183	0,024
250	1,76	0,213	0,017
500	1,79	0,099	0,012
1000	1,69	0,041	0,008
2000	1,64	0,041	0,006
4000	1,41	0,017	0,004

A1.2.2 Resultados do parâmetro EDT

A Tabela A1.3 apresenta os valores da média espacial dos valores medidos de EDT.

Tabela A1.3 – Média espacial dos valores medidos de EDT

f	EDT Média Espacial
(Hz)	(s)
125	1,67
250	1,84
500	1,62
1000	1,77
2000	1,65
4000	1,32

A1.2.3 Resultados de D_{50} , C_{80} , RASTI e STI

A Tabela A1.4 apresenta valores das médias espaciais dos parâmetros D_{50} , C_{80} , RASTI e STI. É ainda calculado o parâmetro $D_{50(500\text{Hz}, 2\text{kHz})}$, que é a média dos valores de D_{50} para as bandas de oitava de 500 Hz e 2000 Hz. Estas são as componentes principais da voz humana.

Tabela A1.4 – Valores médios de D_{50} , C_{80} , RASTI e STI na zona A

f	Média Espacial				
	D_{50}	$D_{50(500\text{Hz}, 2\text{kHz})}$	C_{80}	RASTI	STI
(Hz)	(%)	(%)	(dB)	(%)	(%)
125	32	41	-0,1	56	55
250	31		-0,4		
500	43		1,6		

Média Espacial					
f	D ₅₀	D _{50 (500Hz, 2kHz)}	C ₈₀	RASTI	STI
(Hz)	(%)	(%)	(dB)	(%)	(%)
1000	40		0,5		
2000	38		0,2		
4000	50		2,6		

Importa ainda referir que foram realizadas medições usando como fonte o sistema de altifalantes instalado na sala. Este sistema encontra-se ocultado por trás da faixa de tecido que percorre a sala a todo o perímetro, na altura entre os azulejos e as janelas.

O parâmetro D_{50 (500Hz, 2kHz)} aumentou de 41% para 47%, porém o valor de RASTI apenas aumentou de 56% para 58%, enquanto STI apresentou o mesmo valor de 55%.