

ESTUDO DE CONDICIONAMENTO ACÚSTICO INTERIOR DE UM AUDITÓRIO – AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE QUALIDADE SONORA

Nuno M. Paulino¹, Andreia S. Pereira¹, Diogo M. Mateus¹

¹ Centro de Investigação em Ciências da Construção
Departamento de Engenharia Civil
Universidade de Coimbra
3030-788 Coimbra
(paulino_79@hotmail.com, apereira@dec.uc.pt, diogo@dec.uc.pt)

Resumo

Neste artigo avalia-se o condicionamento acústico interior de um auditório (Auditório Laginha Serafim), existente no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Este auditório, com aproximadamente nove anos, possui capacidade para 230 pessoas, sendo utilizado, sobretudo para realização de conferências, reuniões e colóquios onde se privilegia a percepção da palavra. Inicialmente, são avaliadas as condições de inteligibilidade da sala, através da caracterização experimental da sua resposta impulsiva, seguindo o procedimento descrito na norma ISO 3382, sendo determinados diversos parâmetros acústicos, nomeadamente, tempo de reverberação, índice RASTI, Definição (D_{50}) e níveis sonoros em vários pontos da sala. As medições foram realizadas utilizando uma fonte dodecaédrica posicionada no palco e ainda o sistema de amplificação de som existente. Posteriormente foi desenvolvido um modelo do auditório sendo utilizado o programa comercial de traçado de raios CATT – Acoustic v8, calibrado com base nas medições realizadas. O modelo de simulação permitiu uma avaliação mais exaustiva das condições acústicas da sala e ainda obter os parâmetros acústicos de caracterização da sala após a introdução de possíveis soluções de reabilitação.

Palavras-chave: acústica de salas, parâmetros acústicos, modelação acústica, reabilitação acústica.

Abstract

In this paper the sound propagation inside an auditorium of the Department of Civil Engineering at the University of Coimbra is evaluated. This auditorium with approximately nine years has capacity for 230 people, being used for conferences, meetings and seminars where speech conditions play an important role. The sound propagation inside this space is determined by performing experimental tests to obtain the impulsive response of the room, following the procedure described in ISO 3382. Several acoustic parameters are recorded, namely, the reverberation time, RASTI index, Definition (D_{50}) and sound pressure levels at various points of the room. The measurements were carried out using a dodecaedric source placed on the stage and the amplification sound system of the room. A numerical model of the auditorium was also developed, using the commercial program CATT - Acoustic v8, which was calibrated using measurements results. The simulation model allowed a more thorough evaluation of the acoustic conditions of the room and still get the acoustic parameters after the introduction of possible changes in the room coverings.

Keywords: Room acoustics, measurements, simulation, speech parameters, rehabilitation.

1 Introdução

O estudo da propagação do som no interior de espaços fechados, nomeadamente, auditórios, salas de aula ou salas destinadas a concertos de música é de particular importância, pois este conhecimento permite dotar os espaços fechados de características apropriadas para a obtenção de um ambiente acústico adequado ao seu volume e às suas funções. Refira-se que independentemente do local onde a audiência se encontre, é importante que esta consiga perceber correctamente a palavra, canto ou música. Nesta análise a geometria do espaço, o tipo de revestimentos interiores e o tipo de recheio existente são variáveis importantes deste processo.

Quando se analisam casos de reabilitação acústica, as técnicas de condicionamento acústico são principalmente técnicas que implicam conhecer as características acústicas dos materiais existentes, saber escolher materiais complementares e definir a sua localização.

O estudo das condições de conforto acústico interior de um espaço envolve geralmente a análise de quatro aspectos importantes: ruído de fundo no interior do recinto; ajustamento da duração do tempo de reverberação dos recintos à sua utilização; adequada distribuição de som no interior dos vários espaços fechados (isto é, sem grandes variações nos níveis sonoros); inteligibilidade, clareza e definição dos sons no interior do espaço.

A legislação portuguesa, no que concerne aos edifícios escolares, previa na anterior versão do Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, DL 129/2002 [1], requisitos mínimos apenas para as salas de aula. Este decreto foi recentemente alterado, apresentando nova redacção constante no DL 96/2008 [1], passando a definir requisitos mínimos adicionais para o caso de espaços destinados a auditórios, salas de espectáculo e cinemas. Contudo, muitos espaços fechados (e, em particular, muitas salas de aula) projectados e construídos há alguns anos, quando não existia obrigatoriedade de verificação do cumprimento dos requisitos regulamentares, apresentam deficiências do ponto de vista acústico.

Neste artigo, avaliam-se as condições acústicas interiores de um auditório que apresenta alguns problemas acústicos. Este auditório com aproximadamente nove anos, existente no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, tem sido utilizado principalmente para a realização de conferências, reuniões e colóquios, onde se privilegia a percepção da palavra, tendo-se verificado empiricamente, que apresenta alguns problemas acústicos, nomeadamente ao nível da percepção da palavra. Para tal avaliam-se as condições de inteligibilidade do auditório, através da caracterização experimental da sua resposta impulsiva, sendo determinados diversos parâmetros acústicos especificamente, tempo de reverberação, índice RASTI, Definição (D_{50}) e níveis sonoros em vários pontos da sala. Desenvolve-se ainda um modelo do auditório, sendo utilizado um programa de traçados de raios, calibrado com base nas medições realizadas. Este modelo permite realizar estudos do auditório com $\frac{1}{2}$ lotação e ainda o estudo de possíveis soluções de reabilitação, de modo a determinar as características arquitectónicas e dos materiais que permitam melhorar as condições acústicas do auditório em estudo.

Neste contexto, é apresentada no presente artigo a avaliação do condicionamento acústico interior do Auditório Laginha Serafim, existente no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Inicialmente descreve-se o auditório e apresenta-se a avaliação experimental onde se caracteriza a situação existente. Posteriormente, apresenta-se a avaliação numérica do auditório vazio e a $\frac{1}{2}$ lotação. Por último, apresenta-se o estudo de possíveis soluções de reabilitação do auditório e descrevem-se todas as conclusões do trabalho desenvolvido.

2 Descrição do auditório

O auditório em estudo (Auditório Laginha Serafim) localiza-se no terceiro piso do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Este auditório, com aproximadamente nove anos é utilizado sobretudo para a realização de conferências, reuniões e colóquios onde se privilegia a percepção da palavra. É dotado de dois andares, sendo o acesso a cada um dos andares efectuado por duas portas de madeira existentes. No primeiro andar encontra-se o palco e o espaço da plateia sentada. No segundo andar encontra-se um corredor que circunda o auditório onde as pessoas podem assistir ao que decorre no primeiro piso, mas em pé. Relativamente às características dimensionais do local apresenta-se na Tabela 1 uma síntese das mesmas.

Tabela 1 – Características físicas do local.

Características	Valor
Nº de lugares (N)	230
Volume (V)	1167 m ³
Comprimento máx. (C)	16,25 m
Largura máx. (L)	13,30 m
Pé direito máx. (H)	6,5 m

3 Avaliação experimental do comportamento acústico do auditório

A avaliação experimental do comportamento acústico do auditório, foi efectuada fazendo um levantamento da resposta impulsiva, através da realização de medições acústicas, tendo sido determinados diversos parâmetros que permitiram caracterizar a qualidade sonora do auditório. Os parâmetros medidos foram tempo de reverberação, índice RASTI, Definição (D50) e nível sonoro.

3.1 Condições de ensaio e equipamento utilizado

Com o objectivo de avaliar as condições acústicas no interior do auditório, foram efectuadas medições em 15 pontos, localizados na plateia, considerando uma posição de fonte F1 e utilizando o sistema de amplificação existente, composto por quatro colunas (C1, C2, C3 e C4), conforme se encontra esquematizado na Figura 1.

Na primeira situação procurou-se avaliar a eficácia da sala considerando a sua utilização para actividades em que a percepção da palavra é importante, quando o som é emitido no palco e não se faz uso de amplificação. Neste contexto, foi seleccionada uma posição de fonte no palco representativa do local onde geralmente se emite som (F1), conforme representado na Figura 1.

Na segunda situação analisada considerou-se que o som é amplificado, ou seja, é emitido através de duas colunas montadas nas paredes frontais e duas colunas nas paredes laterais. Esta situação permitirá analisar as condições da sala em situações em que a percepção da palavra é importante quando se recorre à amplificação.

Todas as medições acústicas foram efectuadas em frequência, considerando bandas de oitava, variando entre as frequências centrais de 125 Hz a 4000 Hz em conformidade com a norma ISO 3382 [2],

utilizando a técnica de resposta impulsiva integrada. Em cada posição de microfone (R1, R2, R3, ..., R15) foram efectuadas sempre duas leituras.

Os parâmetros medidos foram: tempo de reverberação, RASTI, Definição e Níveis sonoros. Na medição do tempo de reverberação, RASTI e Definição, foi gerado um ruído MLS, utilizando o sistema Symphonie, existente no Departamento de Engenharia Civil. Na medição dos níveis sonoros utilizou-se um gerador de sinal ligado a um amplificador que emite um ruído rosa.

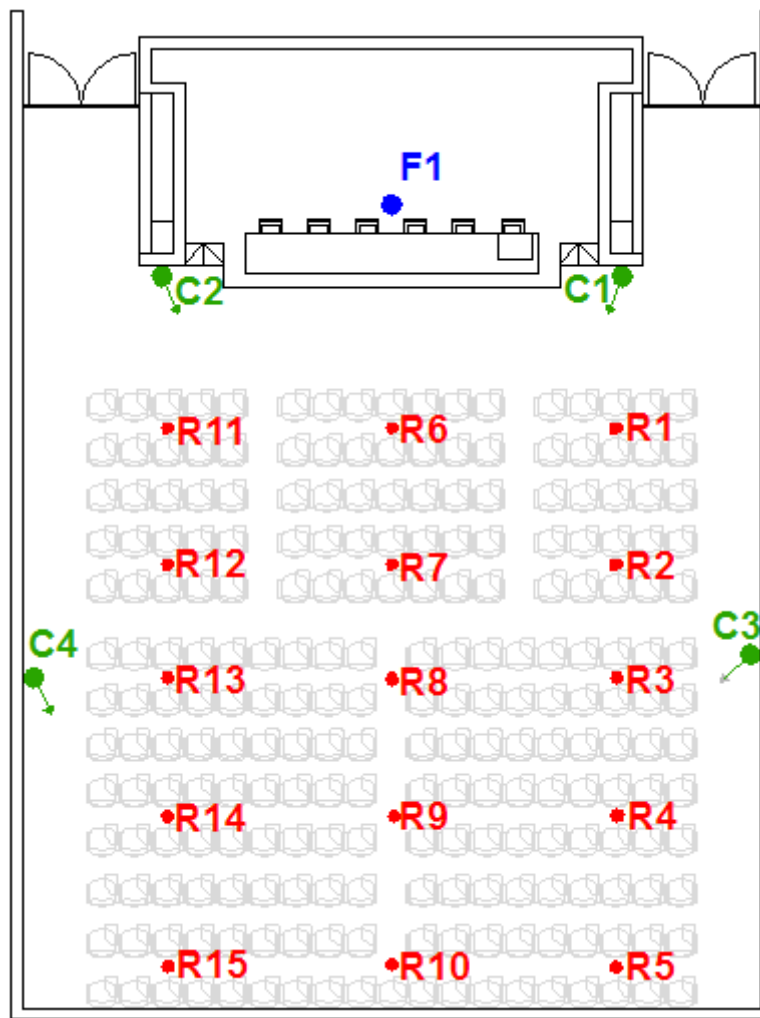


Figura 1 – Planta do 1º piso do auditório, onde se encontram marcadas as posições de fonte, receptores e colunas do sistema de amplificação.

A realização das medições dos parâmetros acústicos foi efectuada com o auditório desocupado. Após a montagem do sistema de medição efectuou-se o posicionamento da fonte e calibrou-se o microfone. Procederam-se em seguida as medições. Os ensaios foram efectuados utilizando os seguintes equipamentos: fonte sonora omnidireccional normalizada de sons aéreos (dodecaédrica), modelo DO 12, da marca 01 dB; analisador portátil, de dois canais, modelo Symphonie, da marca 01dB, ligado a um PC portátil, que permitiu avaliar os níveis sonoros, os tempos de reverberação e parâmetros de inteligibilidade da sala; amplificador, modelo M700, com 600W de potência; gerador de ruído rosa e ruído branco, modelo RG-10; fonte sonora normalizada de sons aéreos, marca Brüel & Kjaer, modelo 4224; microfone modelo 40AF, com pré-amplificador do tipo 26AK, da marca “GRAS – Sound & Vibration”; sistema electroacústico do auditório e calibrador de microfone, modelo 4230.

3.2 Resultados

Os resultados obtidos da avaliação experimental, ou seja, da situação existente no auditório foram os que se apresentam seguidamente na Tabela 2 e na Tabela 3.

Tabela 2 – Valores medidos para o tempo de reverberação e Definição (D_{50}).

Tempo de Reverberação (s)						
Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
F1	2,64	2,32	2,39	2,44	1,97	1,29
Sistema de amplificação	2,37	2,02	2,25	2,37	2,02	1,43
Definição (D_{50})						
Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
F1	0,22	0,19	0,19	0,22	0,26	0,40
Sistema de amplificação	0,33	0,37	0,41	0,48	0,50	0,60

Tabela 3 – Valores medidos do índice RASTI e Nível sonoro.

RASTI								
Receptores	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
F1	0,50	0,42	0,44	0,44	0,53	0,51	0,51	0,49
Sistema de amplificação	0,53	0,54	0,59	0,58	0,55	0,52	0,53	0,56
Nível Sonoro [dB(A)]								
F1	89,0	88,6	88,2	88,1	86,4	90,7	90,1	89,3
RASTI								
Receptores	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	Média
F1	0,49	0,46	0,51	0,50	0,50	0,51	0,50	0,49
Sistema de amplificação	0,53	0,59	0,51	0,53	0,51	0,57	0,59	0,55
Nível Sonoro [dB(A)]								
F1	89,0	88,6	88,2	88,1	86,4	90,7	90,1	-

De acordo com a nova versão do Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios (RRAE) [1], aprovado pelo Decreto-Lei nº 129/2002 de 11/05, mas com a nova redacção dada pelo Decreto-Lei nº 96/2008 de 09/06, em recintos, cuja principal valência corresponda a actividades assentes na oratória, nomeadamente auditórios, o tempo de reverberação, T , correspondente à média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000Hz e 2000Hz, quando o auditório se encontra vazio, deverá ser inferior ou igual a 0,84s (obtido a partir da expressão $T \leq 0.32 + 0.17 \log(V)$). A anterior versão do RRAE, aprovado pelo Decreto-Lei nº 129/2002 de 11/05 exigia que, em edifícios escolares, o tempo de reverberação, T máximo, tendo em conta o volume do auditório deveria ser de 1,58s (obtido a partir da aplicação da expressão $T \leq 0.15 \sqrt[3]{V}$). Refira-se que, de acordo com o artº 7 da nova versão do RRAE, se o espaço em estudo for considerado uma sala de aula, esta exigência mantém-se.

Comparando os valores medidos com os valores de referência definidos no RRAE (quer na antiga quer na nova versão), tendo em conta o volume e a finalidade do auditório em estudo, pode verificar-se que os tempos de reverberação, tanto para a posição de fonte F1 como para o sistema de amplificação, são superiores ao tempo de reverberação máximo regulamentar. Os valores do parâmetro Definição (D_{50}) são igualmente inferiores aos indicados na literatura para esta tipologia de espaço (os valores de

definição deverão ser superiores a 0,50 [3] para todas as frequências), apenas com o sistema de amplificação se atinge na frequência dos 4000Hz um valor superior. Relativamente ao parâmetro RASTI, os valores medidos são também inferiores aos valores de referência (índice RASTI $\geq 0,66$ – indicador de uma inteligibilidade boa [4]). O valor médio medido para a posição de fonte F1 foi de 0,49, indicador de uma inteligibilidade pobre. Os valores medidos com o sistema de amplificação foram ligeiramente superiores, valor médio de 0,55, no entanto, comparando com o valor ideal ainda é um valor reduzido. Finalmente, no que diz respeito ao nível sonoro, verifica-se que nas posições de receptor mais próximas do palco e no eixo da fonte F1, os valores são mais elevados (R1 = 89,0 dB(A), R6 = 90,7 dB(A) e R11 = 89,2 dB(A)) sofrendo uma redução progressiva à medida que a distância à fonte vai sendo maior, atingindo um mínimo nas posições de receptor da última fila do auditório (R5 = 86,4 dB(A), R10 = 88,1 dB(A) e R15 = 86,3 dB(A)). As variações entre a primeira e última fila são não vão ultrapassar os 3dB (A), valores adequados para este auditório.

4 Avaliação numérica do comportamento acústico do auditório

A avaliação numérica do comportamento acústico do auditório efectuou-se desenvolvendo um modelo do auditório utilizando o software CATT – Acoustic [5], que foi calibrado com base nas medições realizadas experimentalmente. Após a construção do modelo realizou-se uma análise do comportamento acústico do auditório considerando que este se destina à percepção da palavra em duas situações distintas: com o auditório vazio e a ½ lotação (situação que o software facultou e que experimentalmente não foi possível avaliar).

4.1 Descrição e calibração do modelo

Para a execução do modelo foi necessária a introdução da geometria do auditório assim como os coeficientes de absorção sonora. Na Tabela 4 apresenta-se uma lista de coeficientes de absorção sonora, resultado da pesquisa realizada ([6], [7], [8] e [9]), que se escolheram para o “input”.

Tabela 4 – Coeficientes de absorção sonora dos diferentes materiais existentes no auditório.

MATERIAIS	FREQUÊNCIA (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
PORTAS						
Porta de Madeira	0.12	0.10	0.08	0.08	0.08	0.08
PAVIMENTO						
Revestimento de pisos rígidos (ex. PVC, “parquet”), dispostos em pavimento rígido	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06
PAREDES						
Betão ou alvenaria de tijolo, rebocado e estucado	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05
Painéis de contraplacado c/ caixa-de-ar	0.12	0.10	0.08	0.08	0.05	0.05
TECTO						
Tecto em gesso cartonado c/ caixa-de-ar	0.16	0.13	0.09	0.07	0.05	0.04
CADEIRAS						
Cadeiras estofadas	0.10	0.14	0.18	0.17	0.32	0.31

Após a construção do modelo, para a avaliação numérica do comportamento acústico do auditório, foi necessário proceder à sua calibração, de modo que os resultados obtidos fossem o mais similar possível aos medidos na avaliação experimental do auditório. A calibração foi efectuada sobre os coeficientes de absorção sonora das cadeiras, tendo sido utilizado como valores de base os valores

encontrados na bibliografia para cadeiras pouco estofadas. Tomando o tempo de reverberação como parâmetro de referência para a calibração do modelo e tendo em conta os valores medidos experimentalmente no auditório, para a posição de fonte F1, os valores dos coeficientes de absorção sonora das cadeiras adoptados foram os constantes na Tabela 4.

4.2 Resultados

Após a calibração do modelo, avaliou-se o comportamento numérico do auditório, considerando que este se destina à percepção da palavra, em duas situações distintas: com o auditório vazio e a ½ lotação. Nas situações mencionadas, considera-se, a posição de fonte ao centro da boca do palco (F1). Os resultados para o auditório vazio obtêm-se, considerando os valores dos coeficientes de absorção sonora das cadeiras admitindo que estão desocupadas, resultantes da calibração, ou seja, <0.10, 0.14, 0.18, 0.17, 0.32, 0.31>. Para obter resultados com o auditório a ½ lotação, optou-se por considerar a ocupação através da diferença entre coeficientes de absorção sonora de uma cadeira pouco estufada [9], ocupada e vazia, <0.56, 0.68, 0.79, 0.83, 0.86, 0.86> e <0.35, 0.45, 0.57, 0.61, 0.59, 0.55> respectivamente. Somando, a diferença dos coeficientes de absorção sonora aos valores dos coeficientes de absorção sonora das cadeiras vazias, obtêm-se os coeficientes de absorção sonora para as cadeiras ocupadas. Os valores dos coeficientes de absorção sonora obtidos para cadeiras ocupadas foram: <0.31, 0.37, 0.40, 0.39, 0.59, 0.62>. Os resultados obtidos para o tempo de reverberação, índice RASTI, Definição e níveis sonoros foram os que se apresentam seguidamente (ver Tabelas 5 e 6).

Da observação dos resultados obtidos (Tabela 5) verifica-se que os tempos de reverberação para ½ lotação do auditório são, tal como esperado, mais baixos, no entanto, continuam a ser elevados.

Ao analisar os resultados obtidos para o parâmetro Definição verifica-se que os valores são baixos, tanto com o auditório vazio como a ½ lotação, pois são inferiores a 0,50 [3], à excepção na frequência dos 4000Hz, onde o valor obtido foi de 0,52 para auditório a ½ lotação.

Tabela 5 – Valores obtidos com o modelo para o tempo de reverberação e Definição (D_{50}).

Tempo de Reverberação (s)						
Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Auditório Vazio	2,46	2,31	2,37	2,38	2,04	1,56
Auditório ½ lotação	2,00	2,04	2,05	2,05	1,72	1,36
Definição (D_{50})						
Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Auditório Vazio	0,35	0,34	0,33	0,32	0,37	0,43
Auditório ½ lotação	0,39	0,40	0,40	0,37	0,44	0,52

Da análise da Tabela 6 verifica-se que os valores do índice RASTI obtidos com o auditório a ½ lotação são mais elevados do que os valores obtidos com o auditório vazio, no entanto, continuam a ser baixos sendo a média obtida de 0,51, ligeiramente superior à média dos valores medidos experimentalmente. Relativamente aos níveis sonoros obtido verifica-se que com o auditório a ½ lotação são ligeiramente mais baixos do que os obtidos com o auditório vazio. Além disso e como se constatou com os resultados experimentais, os valores dos níveis sonoros decrescem à medida que nos afastamos da fonte. A variação dos níveis sonoros com o auditório vazio entre as posições de receptor R1 e R5 é igual a 4,4 dB(A), entre as posições R6 e R10 igual a 4,9dB(A) e por último a variação entre as posições R11 e R15 é igual a 4,5 dB(A). Para o auditório a ½ lotação as variações nas mesmas posições de receptores são respectivamente 5,0 dB(A), 5,2 dB(A) e 4,0 dB(A), concluindo-se que entre a primeira e última fila o nível sonoro tem um decaimento maior com o auditório a ½ lotação à excepção nas posições R11 e R15.

Tabela 6 – Valores obtidos com o modelo para o índice RASTI e nível sonoro.

RASTI								
Receptores	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Auditório Vazio	0,47	0,46	0,47	0,47	0,48	0,47	0,44	0,45
Auditório ½ lotação	0,49	0,49	0,51	0,52	0,52	0,50	0,49	0,49
Nível Sonoro [dB(A)]								
Auditório Vazio	84,2	83,7	83,3	82,3	79,8	84,9	84,3	83,6
Auditório ½ lotação	83,5	83,1	82,5	81,3	78,5	84,3	83,7	82,8
RASTI								
Receptores	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	Média
Auditório Vazio	0,45	0,45	0,47	0,46	0,46	0,47	0,45	0,46
Auditório ½ lotação	0,52	0,54	0,48	0,49	0,51	0,52	0,51	0,51
Nível Sonoro [dB(A)]								
Auditório Vazio	82,4	80,0	84,2	83,9	83,4	82,4	79,7	-
Auditório ½ lotação	81,4	79,1	83,2	83,1	83,0	81,8	79,2	-

5 Estudo de soluções de reabilitação acústica do auditório

Com o objectivo de melhorar as condições acústicas no interior do auditório, foi efectuado o estudo de três soluções de reabilitação do auditório: uma solução minimalista, uma solução intermédia e uma solução melhorada. Estas soluções foram simuladas no modelo, de modo a permitir averiguar a sua eficácia, através da análise dos parâmetros avaliados anteriormente.

5.1 Descrição das soluções de correcção acústica adoptadas

No sentido de melhorar a qualidade acústica do auditório, simulou-se no modelo uma primeira solução minimalista que consistiu em quebrar a horizontalidade do tecto existente por cima do palco, através da aplicação de um tecto falso liso suspenso, reduzindo o pé direito em 2,00m junto à parede, de forma a aumentar a energia reflectida para a plateia. Os valores dos coeficientes de absorção utilizados para a simulação desta solução foram os mesmos que os usados para o tecto na construção do modelo. Após a simulação e a análise dos resultados da primeira solução, propôs-se uma solução intermédia que consistiu em manter o tecto falso liso suspenso e ainda colocar na parede do balcão, pertencente à varanda do piso superior, voltada para o palco, placas de gesso perfuradas (furação de 10mm de diâmetro e espaçamento de 13mm) confinando uma camada de ar com espessura 60mm, preenchida com fibra mineral, tendo valores dos coeficientes de absorção sonora por oitavas de <0.29, 0.58, 0.99, 0.82, 0.53, 0.83>. Por último, simulou-se uma terceira solução melhorada. Esta solução consiste em manter as duas soluções anteriormente descritas e ainda aplicar uma maior quantidade de material absorvente nas paredes e tectos.

De forma a manter a mesmo tipo de materiais, e de maneira a conservar o mesmo aspecto do auditório, consideraram-se para o lugar dos painéis de madeira existentes no auditório uns painéis de madeira perfurada (furação de 4mm de diâmetro e espaçamento de 8mm) com 12mm de espessura e lã mineral na caixa-de-ar. Nas paredes colocaram-se as mesmas placas de gesso perfuradas que se usaram na solução intermédia para o balcão. Quanto aos tectos, optou-se por aplicar placas de gesso perfuradas (furação de 12mm de diâmetro e espaçamento de 13mm) confinando uma camada de ar com 400mm de espessura, preenchida com fibra mineral, tendo valores de coeficientes de absorção sonora por

oitavas de $\langle 0.67, 0.92, 0.75, 0.84, 0.62, 0.73 \rangle$. Estes materiais foram colocados até meio do auditório, tanto nos tectos como nas paredes do piso superior e inferior.

Os valores dos coeficientes de absorção e as soluções adoptadas, consideradas anteriormente, tiveram por base a informação referenciada em catálogos comerciais das empresas Knauf [10] e Castelhana & Ferreira [11]. Seguidamente apresenta-se uma análise detalhada para os resultados obtidos.

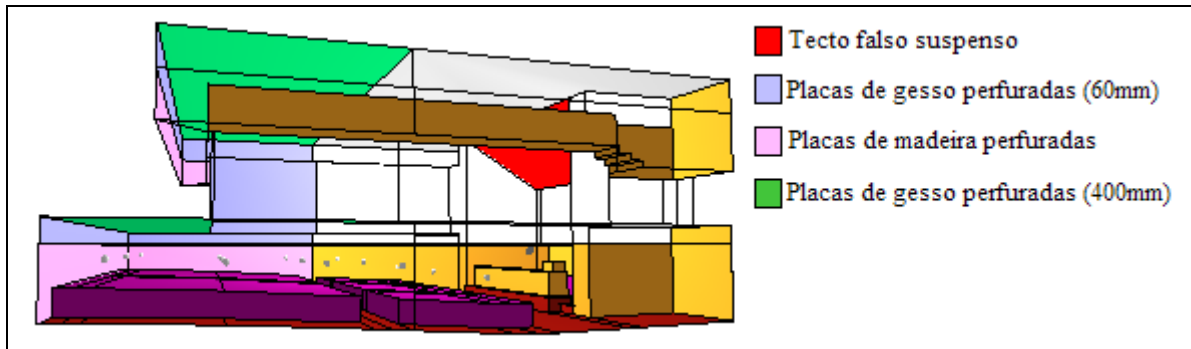


Figura 2 – Esquema representativo da localização dos materiais aplicados.

5.2 Resultados

Após a simulação das três soluções de reabilitação, os resultados obtidos, com o auditório vazio, foram os que se apresentam seguidamente (ver Figuras 3 a 6).

Da análise da Figura 3, conclui-se que a solução minimalista, não traz grande alteração aos resultados, apenas baixa um pouco os valores do tempo de reverberação nas baixas e médias frequências, sendo a redução máxima registada na frequência dos 125Hz de 0,49 s.

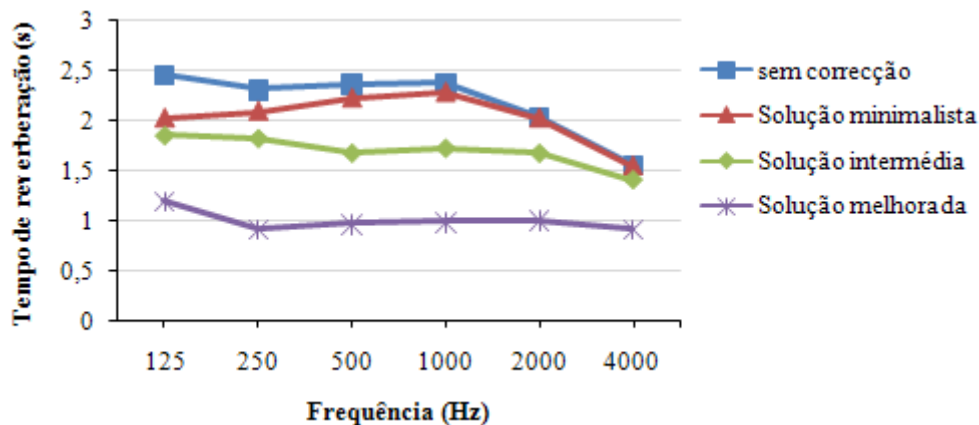


Figura 3 – Tempos de reverberação obtidos com a posição de fonte F1 para as diferentes soluções de correcção acústica.

A solução intermédia baixa o tempo de reverberação significativamente em todas as frequências, sendo o valor médio nas bandas de frequências do 500Hz, 1000Hz e 2000Hz igual a 1,70 s.

Como esperávamos a solução melhorada é a que apresenta melhores resultados sendo o valor médio nas bandas de frequências dos 500Hz, 1000Hz e 2000Hz igual a 0,99 s. Este poderá ser considerado um bom resultado, se tivermos como referência o requisito exigido na anterior versão do RRAE

(Decreto – Lei nº 129/2002 de 11 de Maio), onde o limite máximo para o valor de T, tendo em conta o volume do nosso auditório, é de 1,58 s.

Contudo, com base na nova versão do RRAE (Decreto-Lei nº 129/2002 de 11/05, mas com a nova redacção dada pelo Decreto-Lei nº 96/2008 de 09/06), este valor de $T=0,99$ s pode ainda ser considerado exagerado, visto que o limite máximo para o valor de T baixou para 0,84 s.

Como se pode observar da Figura 4, os resultados obtidos para a solução minimalista não são bons, ou seja são inferiores a 0,50. Para a solução intermédia obtêm-se valores ligeiramente superiores comparativamente com a solução minimalista, no entanto, só na frequência dos 500Hz e 4000Hz é que se obtêm valores razoáveis (0,50 e 0,55 respectivamente). Com a solução melhorada os resultados são bons obtendo-se na frequência dos 4000Hz o melhor resultado do parâmetro Definição, sendo o valor de 0,73.

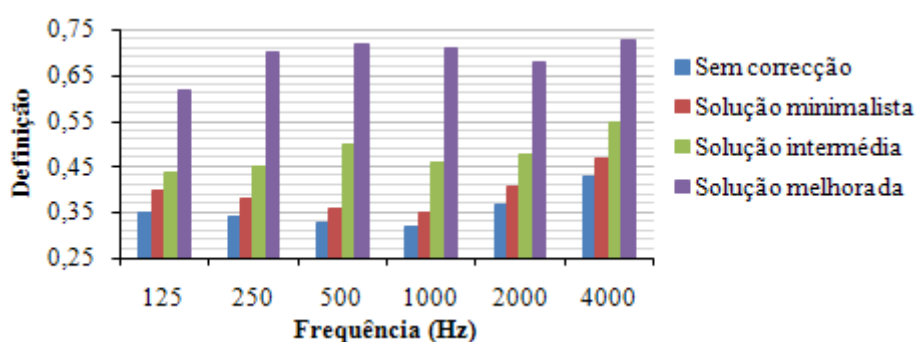


Figura 4 – Valores do parâmetro Definição obtidos com a posição de fonte F1 para as diferentes soluções de correcção acústica do auditório.

Verifica-se da análise da Figura 5 que os valores do índice RASTI obtidos com a solução minimalista aumentam ligeiramente, no entanto, continuam a não ser bons, pois o valor médio nas quinze posições de receptor é igual a 0,49. Com a solução intermédia proposta obtêm-se valores razoáveis, ou seja, superiores a 0,50 sendo a média dos valores de 0,55. Por último, com a solução melhorada obtêm-se bons resultados pois os valores nas posições de receptor são iguais ou superiores a 0,66, sendo a sua média de 0,69, valor indicador de uma boa inteligibilidade.

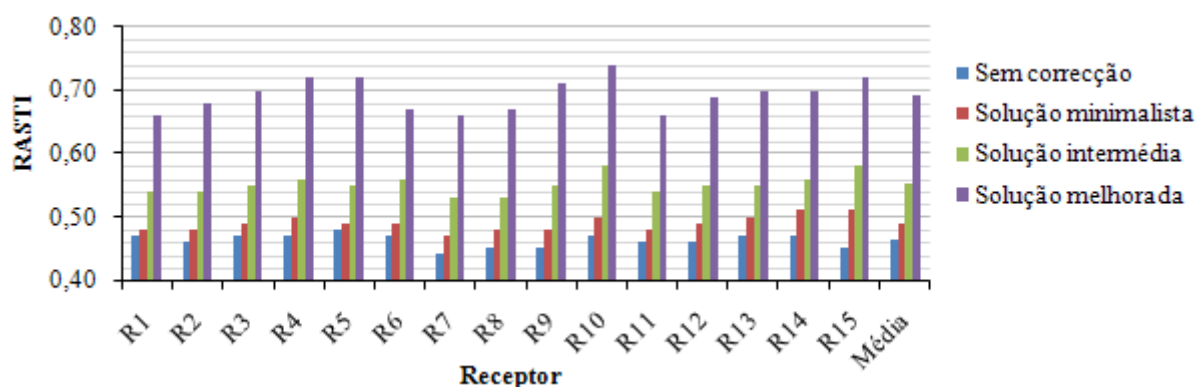


Figura 5 – Valores do índice RASTI obtidos com a posição de fonte F1 para as diferentes soluções de correcção acústica do auditório.

Conclui-se da análise Figura 6 da que os valores do nível sonoro com o auditório sem correcção são menores relativamente aos valores obtidos com a solução minimalista. Se analisarmos as posições da primeira fila, R1, R6 e R11, onde os valores com o auditório sem correcção são respectivamente 84,2

dB(A), 84,9 dB(A) e 84,2 dB(A) e com a solução minimalista são respectivamente 84,5 dB(A), 85,1 dB(A) e 84,3 dB(A), existe um ligeiro aumento [$\Delta=0,3$ dB(A), $\Delta=0,2$ dB(A) e $\Delta=0,1$ dB(A)]. Este aumento, devido à introdução do tecto falso suspenso que quebra a horizontalidade, faz com que haja um maior número de reflexões para a plateia, no entanto, a sua influência nos níveis sonoros é praticamente desprezável. As variações entre as primeiras e últimas filas, R1 e R5, R6 e R10 e R11 e R15 para o auditório sem correcção são respectivamente 4,40 dB(A), 4,90 dB(A) e 4,50 dB(A), enquanto para o auditório com a solução melhorada são respectivamente 7,40 dB(A), 7,20 dB(A) e 7,30 dB(A), ou seja, existe um decréscimo mais elevado com a solução melhorada.

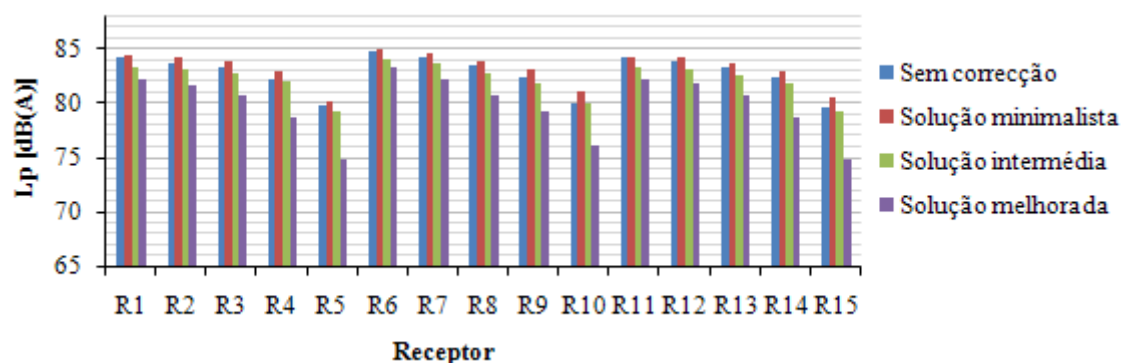


Figura 6 – Valores do índice RASTI obtidos com a posição de fonte F1 para as diferentes soluções de correcção acústica do auditório.

6 Conclusões

Através da análise dos resultados, da avaliação acústica do auditório em estudo, verificou-se que este apresenta algumas deficiências acústicas. Os tempos de reverberação medidos são elevados e os valores do índice RASTI obtidos são baixos, revelando uma má inteligibilidade da palavra. O parâmetro Definição (D_{50}) medido, também não apresenta bons resultados pois os valores encontram-se abaixo dos de referência, evidenciando que a inteligibilidade não é boa. Para este auditório, onde se realizam nomeadamente colóquios, conferências e reuniões, isto é indicativo de conversação difícil, por vezes inteligível, provocando portanto fadiga e desconcentração tanto por parte do orador como por parte dos ouvintes.

Relativamente aos resultados obtidos com o modelo verificou-se que, para $\frac{1}{2}$ lotação, os tempos de reverberação, na posição de fonte F1 (palco), são tal como esperado, mais baixos, no entanto, continuam a ser elevados. Os valores do índice RASTI, obtidos nestas duas posições de fonte, apesar de sofrerem um ligeiro aumento, continuam a ser baixos. Para o parâmetro Definição (D_{50}), com o auditório a $\frac{1}{2}$ lotação os valores são igualmente baixos (inferiores a 0,50) em praticamente todas as frequências, para estas duas posições de fonte.

Face aos resultados obtidos por simulação de três situações reabilitação analisadas, verificou-se que a solução minimalista embora reduza os tempos de reverberação e melhore ligeiramente os parâmetros, RASTI e Definição, não é uma boa solução. Relativamente à solução intermédia, verifica-se uma redução significativa do tempo de reverberação, no entanto, ainda não cumpre o disposto na nova versão do RRAE (Decreto-Lei n.º 96/2008 de 09/06). Contudo, apresenta resultados razoáveis em relação aos parâmetros RASTI e Definição, ou seja, consegue-se uma inteligibilidade razoável. Será por isso, uma solução a adoptar se se pretender melhorar as condições acústicas, obter resultados razoáveis e além disso se quisermos uma solução económica, pois requer aplicações e substituição de

uma área de revestimentos controlada. A solução melhorada é aquela que apresenta bons resultados, constatando-se, no entanto, que foi necessário colocar uma grande quantidade de material absorvente. Da análise efectuada, concluiu-se ainda que a nova versão do RRAE introduz um limite regulamentar para o tempo de reverberação muito mais baixo relativamente ao disposto na anterior versão do RRAE (Decreto-Lei nº 129/2002 de 11/05). Verificou-se, portanto, para o caso em estudo, que o valor limite exigido pelo novo decreto é 53% do valor exigido pelo antigo decreto, levando assim à introdução de uma maior quantidade de material absorvente para baixar o tempo de reverberação. O tempo de reverberação obtido com a solução melhorada é de 0,99 s para a posição de fonte F1. Apesar de este valor não cumprir as exigências da nova versão do RRAE, permite uma melhoria significativa das condições acústicas do auditório, não levando à colocação de uma área de absorção exagerada.

Referências

- [1] RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, aprovado pelo Decreto-Lei nº 129/2002 de 11/05, com a nova redacção dada pelo Decreto-Lei nº 96/2008 de 09/06.
- [2] ISO 3382 Acoustic – measurement of reverberation time of rooms with references to other acoustical parameters, 1997.
- [3] Isbert, A. *Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos*”, Edicions UPC. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1998.
- [4] Silva, P. *Projecto de Condicionamento Acústico de Edifícios*, 1ª edição, LNEC, Lisboa, 2006.
- [5] CATT-Acoustic v8. *Room Acoustic Prediction and Desktop Auralization*, User’s Manual, 2002.
- [6] Patrício, J. V. *Acústica nos Edifícios*, 2ª edição, LNEC, Lisboa, 2004.
- [7] Lawrence, A. *Architectural Acoustic*. Elsevier Publishing Company Ltd., 1970.
- [8] Karlen, L. *Akustik i rum och byggander*, Svensk Byggtjanst, 1983.
- [9] Beranek, L. *Concert and Opera Halls – How They Sound*, Acoustical Society of America, 1996.
- [10] Knauf, *Sistemas de Construcción en Seco Knauf – Documentación General y Técnica*, 1ª Edición, Knauf GmbH Sucursal en España, 2006.
- [11] Castelhana & Ferreira, *Acústica XXI – Painéis de correcção acústica*, catálogo comercial. Indústria de Tectos Falsos e divisórias, S.A., 2004.