



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Diana Rogério Soares

CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DE ESPAÇOS:
ANÁLISE DE UMA SOLUÇÃO DE ACÚSTICA VARIÁVEL

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma
Construção Sustentável, no ramo de Acústica e Vibrações em Ambiente
Urbano, orientada pela Professora Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira e
pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho e apresentada ao
Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade de Coimbra

Março de 2020

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Diana Rogério Soares

Condicionamento Acústico de espaços: Análise de uma Solução de Acústica Variável

Acoustic Conditioning of spaces: Analysis of a Variable acoustics solution

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, no ramo de Acústica e Vibrações em Ambiente Urbano, orientada pela Professora Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira e pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho

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.

Março de 2020



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à Prof.^a Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira e ao Prof. Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho, pela orientação, disponibilidade, apoio, interesse, paciência e todos os ensinamentos transmitidos desde o início do presente trabalho.

Em segundo lugar, agradeço aos professores do Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável por todos os conteúdos, ensinamentos e contributos transmitidos, durante esses anos na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, que contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos que fiz em Coimbra, que foram essenciais no suporte, palavras de incentivo e apoio nestes anos, proporcionando momentos inesquecíveis e virando uma família longe de casa.

Agradeço também aos meus amigos do Brasil que, mesmo de longe, sempre se fizeram presentes dando apoio, carinho e mandando energias positivas.

Por fim, agradeço à minha família, em especial, aos meus pais, à minha irmã e aos meus avós, por todo amor incondicional, ao longo da minha formação académica, por estarem sempre presentes dando força e me incentivando a seguir em frente mesmo nos momentos difíceis. Este trabalho é dedicado a vocês.

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito do Projeto CENTRO-01-0247-FEDER-033884 (ADJUST), financiado por fundos FEDER através do COMPETE 2020, Portugal 2020. Esta tese foi igualmente apoiada por fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade - COMPETE e por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito do projeto POCI-01-0145-FEDER-007633 (ISISE).

RESUMO

Com o crescente uso da tecnologia, a arquitetura e a sociedade se desenvolveram criando uma nova forma de viver, e modificando a relação entre o espaço e as pessoas. Diante disso, o espaço precisa ser adaptado frente as novas demandas sociais para que se torne num ambiente flexível, já que a relação homem e espaço está sempre em mutação. Assim, uma das formas de trazer uma flexibilidade ao ambiente é variando a função do espaço, ou seja, criando um espaço com dois ou mais usos.

Esta nova forma de relacionamento do Homem com o espaço fez com que muitos espaços multifuncionais estejam a ser criados, e com isso, surge, em alguns casos, a necessidade de adaptar o conforto acústico do ambiente para que cumpra com requisitos de acordo com as funções do espaço. Uma das formas de alterar as condições acústicas destes ambientes consiste em utilizar painéis que promovem uma acústica variável, que possibilita que um espaço com diferentes demandas sonoras tenha um bom desempenho acústico.

Este trabalho tem como objetivo um estudo prévio para o desenvolvimento de um painel acústico reconfigurável que possibilite a variação da absorção sonora de acordo com as demandas acústicas de um ambiente multiusos. Este painel deverá cumprir requisitos acústicos, bem como princípios estéticos, visto que este fator é decisivo na escolha dos arquitetos.

A análise de desempenho acústico deste painel foi realizada a partir de modelagem numérica utilizando o software de traçado de raios, CATT Acoustic, de modo a identificar as características de absorção sonora que introduziram alterações nas condições acústicas de um ambiente, tanto para a variação da ocupação do ambiente, quanto para a variação da utilização do mesmo. Foi ainda efetuado um estudo de implementação da solução para dois estudos de caso, o Anfiteatro AFD3.1 e o Auditório Laginha Serafim, localizados no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. A partir dos estudos realizados, foi comparado os resultados obtidos para a reabilitação com uma solução fixa e uma solução com o conceito de acústica variável, quanto aos parâmetros de qualidade acústica de tempo de reverberação, nível sonoro e índice RASTI, concluindo que os ganhos acústicos proporcionados pela solução variável são mínimos e não compensam o custo associado a implementação.

Palavras-chave: Acústica Variável, Painel, Estética, Reabilitação, Simulação Acústica.

ABSTRACT

Given the increasing use of technology, architecture and society have created a new way of living and changed the relationship between people and their surroundings. Therefore, space needs to be adapted to new social demands and it becomes a flexible environment, since the relationship between man and space is always changing. Thus, one of the ways to bring flexibility to the environment is by varying the function of the space, which means to create a space with two or more functionalities.

This new way of relationship between Man and space made possible the creation of many multifunctional spaces, and from that, arises the need to adapt the acoustic comfort of the environment to match requirements according to the functions of the space. One way to change the acoustic conditions of these environments is to use panels that promote variable acoustics, which allows a space with different sound demands to have a great acoustic performance.

The objective of this work is to create an early study for the development of a reconfigurable acoustic panel that allows the variation of sound absorption according to the acoustic demands in a multipurpose environment. This panel must fit acoustic requirements, as well as aesthetic principles, since this factor is decisive in the choice of architects.

The analysis of the acoustic performance of this panel was performed based on numerical modelling, using the ray tracing software CATT Acoustic in order to identify the sound absorption characteristics that allows to introduce changes in the acoustic conditions of an environment, both for the variation of occupation, as well as for the variation of its use. A study was carried out to implement the solution for two case studies, the AFD3.1 Amphitheater and the Laginha Serafim Auditorium, located in the Department of Civil Engineering of the University of Coimbra. Based on the studies carried out, the results obtained for the rehabilitation with a fixed solution and a solution with the concept of variable acoustics were compared, regarding the acoustic quality parameters of reverberation time, sound level and RASTI index, concluding that the acoustic gains provided by the variable solution are minimal and do not offset the cost associated with its implementation.

Keywords: Variable Acoustics, Panel, Aesthetics, Rehabilitation, Acoustic Simulation.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento e Motivação	1
1.2	Objetivo	3
1.3	Estrutura da Dissertação	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Condicionamento Acústico Interior de Salas	5
2.2	Absorção Sonora	6
2.2.1	Conceito e Propriedades.....	6
2.2.2	Materiais Porosos ou Fibrosos	7
2.2.3	Membranas ou Painéis Ressonantes.....	8
2.2.4	Materiais Ressonadores.....	9
2.3	Difusão Sonora	11
2.3.1	Conceito e Propriedades.....	11
2.3.2	Sistemas Híbridos (Absorção e Difusão)	13
2.4	Acústica Variável	13
2.4.1	Solução a partir da Variação no Volume da Sala.....	14
2.4.2	Solução a partir da Variação na Absorção da Sala.....	17
2.5	Parâmetros Acústicos Para Avaliação De Espaços Fechados	20
2.5.1	Nível Sonoro	20
2.5.2	Tempo de Reverberação.....	21
2.5.2.1	Métodos Simplificados	22
2.5.2.2	Valores de Referência.....	23
2.5.3	RASTI	25
3	ESTUDO DE CASO 1: ANFITEATRO AFD 3.1	27
3.1	Caracterização do Objeto de Estudo.....	27
3.1.1	Descrição do Anfiteatro	27
3.1.2	Descrição das Condicionantes Acústicas	28
3.1.3	Descrição do Modelo	29
3.1.4	Resultados	30
3.2	Modelagem Numérica e Calibração	32
3.2.1	Calibração do Modelo	32
3.2.2	Análise Numérica do Modelo	34
3.3	Solução com o Conceito de Acústica Variável – Anfiteatro AFD 3.1	36
3.3.1	Variação do Ocupação	38
3.4	Reabilitação com Conceito de Acústica Variável - Anfiteatro AFD 3.1.....	40

3.4.1	Reabilitação – Solução Inicial Fixa.....	40
3.4.2	Resultados Obtidos.....	41
3.4.2.1	Nível Sonoro.....	41
3.4.2.2	RASTI.....	42
3.4.3	Reabilitação - Solução Variável.....	43
3.4.4	Resultado Obtidos	46
3.4.4.1	Nível Sonoro.....	48
3.4.4.2	RASTI.....	48
3.4.5	Comparação de Resultados da Reabilitação.....	49
3.4.5.1	Nível Sonoro.....	49
3.4.5.2	Tempo de Reverberação e RASTI.....	51
4	ESTUDO DE CASO 2: AUDITÓRIO LAGINHA SERAFIM	53
4.1	Caracterização do Objeto de Estudo.....	53
4.1.1	Descrição do Auditório	53
4.1.2	Descrição das Condicionantes Acústicas	54
4.1.3	Descrição do Modelo	55
4.1.4	Resultados	56
4.2	Modelagem Numérica e Calibração	58
4.2.1	Calibração do Modelo	58
4.2.2	Análise Numérica do Modelo	61
4.3	Solução com Conceito de Acústica Variável – Auditório Laginha Serafim	62
4.4	Reabilitação com Conceito de Acústica Variável - Auditório Laginha Serafim.....	64
4.4.1	Reabilitação – Solução Inicial Fixa.....	64
4.4.2	Resultados Obtidos.....	65
4.4.2.1	Nível Sonoro.....	65
4.4.2.2	RASTI.....	66
4.4.3	Reabilitação - Solução Variável.....	67
4.4.4	Resultados Obtidos.....	70
4.4.4.1	Nível Sonoro.....	71
4.4.4.2	RASTI.....	72
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
5.1	Conclusões.....	74
5.2	Trabalhos futuros.....	76
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
	ANEXO I – Plantas, cortes e fotografias do Anfiteatro AFD3.1.	I
	ANEXO II – Resultados obtidos da avaliação do modelo numérico do Anfiteatro AFD3.1...III	III
	ANEXO III – Resultados obtidos da avaliação do modelo numérico com reabilitação inicial fixa do Anfiteatro AFD3.1.	IV
	ANEXO IV – Resultados obtidos da avaliação do modelo numérico com reabilitação com acústica variável do Anfiteatro AFD3.1.	VI

ANEXO V – Plantas e cortes do Auditório Laginha Serafim.	VIII
ANEXO VI – Resultados obtidos da avaliação do modelo numérico do Auditório Laginha Serafim.	X
ANEXO VII – Resultados obtidos da avaliação do modelo numérico com reabilitação inicial fixa do Auditório Laginha Serafim.....	XI
ANEXO VIII – Resultados obtidos da avaliação do modelo numérico com reabilitação com acústica variável do Auditório Laginha Serafim.	XII

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Tempo Ótimo de reverberação, a 500Hz, para diferentes utilizações (Tadeu at al, 2010).	2
Figura 2.1 - Características de materiais absorventes, refletores e difusores (Cox e D'Antônio, 2009).	5
Figura 2.2 - Coeficiente de absorção de um mesmo material para duas espessuras diferentes (Cox e D'Antônio, 2009).	8
Figura 2.3 - Sistema de membrana ou painel ressonante (Ginn,1978).	8
Figura 2.4 - Coeficiente de absorção de painel ressonante e material poroso em função da frequência (Barron, 2009).	9
Figura 2.5 - Painel perfurado utilizado como um ressoador de Helmholtz (Ginn, 1978).)	9
Figura 2.6 - Ondas cilíndrica sendo refletidas a) Em uma superfície plana b) Em uma superfície convexa c) Em uma superfície difusora (Cox e D'Antônio, 2009).	12
Figura 2.7 - Sistema BAD panel (da esquerda para a direita tem: a lã mineral, o painel perfurado refletor e o material decorativo) (Cox e D'Antônio, 2009).	13
Figura 2.8 - Configuração e representação das reflexões úteis sem repartição móvel vertical no Veterans' Memorial Auditorium, San Rafael (Califórnia) (Isbert,1998).	15
Figura 2.9 - Configuração e representação das reflexões úteis com repartição móvel vertical no Veterans' Memorial Auditorium, San Rafael (Califórnia) (Isbert,1998).	15
Figura 2.10 - Exemplos de planta e corte de sala com cavidades reverberantes (Isbert, 1998).	16
Figura 2.11 - Exemplo na modificação na altura dos painéis suspensos, à esquerda painéis em configuração normal e à direita, painéis mais próximo do público, ocultando cadeiras superiores (Isbert, 1998).	16
Figura 2.12 - Configurações dos painéis móveis refletores: a) mínima absorção b) máxima absorção (Isbert, 1998).	18
Figura 2.13 - Configurações dos painéis móveis refletores perfurados: a) painéis sobrepostos formando ressonador múltiplo b) painéis desalinhados escondendo o material absorvente (Isbert, 1998).	18
Figura 2.14 - Possibilidades de configuração do painel com rotação de 90° (Isbert,1998).	19
Figura 2.15 - Configurações dos painéis com rotação 180°: a) máxima absorção b) mínima absorção (Isbert, 1998).	19

Figura 2.16 - Configurações dos painéis com rotação 360° com faces difusora, absorvente e refletora (Isbert, 1998).	20
Figura 2.17 - Tempo de Reverberação (Tadeu et al, 2010).	21
Figura 2.18 - Variação do tempo de reverberação óptimo em função da frequência e para o tempo de reverberação para os 500Hz (Tadeu et al, 2010).	23
Figura 2.19 - Limite máximo do valor de tempo de reverberação para edifícios escolares, de acordo com o RRAE.	24
Figura 3.1 – Vista Interna do Anfiteatro AFD 3.1	28
Figura 3.2 - Modelo Anfiteatro AFD 3.1 com posicionamento de Fonte A1 e Receptores do 1 ao 15 na plateia.	30
Figura 3.3 – Gráfico com tempos de reverberação dos resultados experimentais, numérico e analítico para o anfiteatro.	31
Figura 3.4 – Gráfico com os tempos de reverberação experimental, sem e com calibração do anfiteatro.	34
Figura 3.5 - Diferenças entre níveis sonoros entre receptores nas primeiras e últimas fileiras do anfiteatro.	35
Figura 3.6 - Valores do índice RASTI obtidos através dos modelos numéricos com e sem calibração e do método experimental do anfiteatro.	36
Figura 3.7 - Esquema da solução com conceito de acústica variável. a) Esquema em planta das faces do painel tridimensional. b) Esquema 3D da solução do painel	37
Figura 3.8 - Esquema gráfico da ocupação considerada na variação do público do Anfiteatro AFD3.1.	39
Figura 3.9 - Disposição de materiais em 1/3 do fundo para a solução inicial fixa do anfiteatro. a) Material escolhido b) Solução em planta baixa c) Solução em 3D gerada no CATT Acoustic.	40
Figura 3.10 - Valores de níveis sonoros obtidos para o anfiteatro com a solução de reabilitação e o modelo numérico sem reabilitação.	42
Figura 3.11 - Valores do índice RASTI obtidos para o anfiteatro com e sem reabilitação para a plateia sem ocupação.	43
Figura 3.12 - Disposição de materiais em 1/3 do fundo do anfiteatro para a solução com acústica variável para cumprir 2/3 de ocupação e sala lotada. a) Material escolhido b) Solução em planta baixa c) Solução em 3D gerada no CATT Acoustic.	44
Figura 3.13 - Disposição de materiais em 1/3 do fundo do anfiteatro para a solução com acústica variável para cumprir 1/3 de ocupação. a) Material escolhido a) Solução em planta baixa b) Solução em 3D gerada no CATT Acoustic.	45
Figura 3.14 - Representação esquemática das faces do painel tridimensional com acústica variável para o anfiteatro. a) Em planta b) Em 3D.	47

Figura 3.15 – Imagem renderizada da Solução Fixa e Solução 1 ao ser instalada no Anfiteatro AFD3.1. a) Painel com solução instalada na sala b) Imagem amplificada da solução.	47
Figura 3.16 - Imagem renderizada da Solução 2 ao ser instalada no Anfiteatro AFD3.1. a) Painel com solução instalada na sala b) Imagem amplificada da solução.	47
Figura 3.17 - Valores de nível sonoro obtidos para o anfiteatro reabilitado e com as variações de ocupação para a solução de acústica variável.	48
Figura 3.18 - Valores do índice RASTI obtidos para o anfiteatro reabilitado e com as variações de ocupação para a solução de acústica variável.	49
Figura 3.19 - Valores de níveis sonoros obtidos para solução fixa e variável para 1/3 de ocupação do anfiteatro.	50
Figura 3.20 - Valores de níveis sonoros obtidos para solução fixa e variável para 2/3 de ocupação do anfiteatro	50
Figura 4.1 - Vista Interna do Auditório Laginha Serafim	54
Figura 4.2 - Modelo do Auditório Laginha Serafim com posicionamento de Fonte A1 e Receptores do 1 ao 15 na plateia, desenvolvido no CATT Acoustic.	56
Figura 4.3 - Gráfico com tempos de reverberação dos resultados experimentais, numérico e analítico para o auditório.	57
Figura 4.4 - Gráfico com os tempos de reverberação experimental, sem e com calibração do auditório.	60
Figura 4.5 - Diferenças entre níveis sonoros entre receptores nas primeiras e últimas fileiras do auditório.	61
Figura 4.6 – Índice RASTI no auditório, resultantes dos ensaios e do modelo numérico.	62
Figura 4.7 - Disposição de materiais para a solução inicial fixa da reabilitação do auditório.	65
Figura 4.8 - Valores de níveis sonoros obtidos para o auditório com a solução com reabilitação e o modelo numérico sem reabilitação.	66
Figura 4.9 - Valores do índice RASTI obtidos para o auditório com e sem reabilitação.	67
Figura 4.10 - Disposição de materiais no auditório para a solução de reabilitação com o conceito de acústica variável para segunda face do painel.	68
Figura 4.11 - Disposição de materiais no auditório para a solução de reabilitação com o conceito de acústica variável para terceira face do painel.	69
Figura 4.12 - Representação esquemática das faces do painel tridimensional com acústica variável para o auditório.	70
Figura 4.13 - Valores de níveis sonoros obtidos para solução fixa e variável (Solução 1 e 2) para o auditório.	71
Figura 4.14 - Valores do índice RASTI obtidos para o auditório reabilitado com a solução de acústica variável.	72

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Relação entre o parâmetro RASTI e a avaliação da inteligibilidade da palavra (Isbert, 1998).	26
Quadro 3.1 - Características dimensionais do Anfiteatro AFD 3.1	28
Quadro 3.2 – Área e coeficientes de absorção sonora dos materiais existentes no Anfiteatro AFD 3.1	29
Quadro 3.3 - Resultados de Tempo de Reverberação para cada frequência, obtidos para o Anfiteatro AFD3.1.	31
Quadro 3.4 - Diferenças entre tempos de reverberação experimental e numérico antes da calibração para o anfiteatro.	32
Quadro 3.5 - Coeficientes de absorção sonora iniciais e finais adotados para a calibração do modelo do anfiteatro.	33
Quadro 3.6 - Tempos de reverberação experimental e numérico sem e com calibração do anfiteatro.	34
Quadro 3.7 - Valores de coeficientes de absorção sonora conforme a variação da ocupação da plateia do anfiteatro.	38
Quadro 3.8 - Tempos de reverberação com variação de ocupação em modelo numérico calibrado do anfiteatro.	39
Quadro 3.9 - Tempos de reverberação do anfiteatro com solução fixa e a variação de ocupação.	41
Quadro 3.10 - Tempo de reverberação para o anfiteatro com primeira solução para compor painel de acústica variável, com variação da ocupação.	44
Quadro 3.11 - Tempo de reverberação para o anfiteatro com segunda solução para compor painel de acústica variável, com variação da ocupação.	46
Quadro 3.12 - Valores de Tempo de reverberação médio e RASTI obtidos para a solução fixa e variável com todos os tipos de ocupação do anfiteatro.	51
Quadro 4.1 - Características dimensionais do Auditório Laginha Serafim	53
Quadro 4.2 - Área e coeficientes de absorção sonora dos materiais existentes no Auditório Laginha Serafim.	55
Quadro 4.3 - Valores de Tempo de Reverberação médio e para cada banda de frequência, obtidos para o Auditório Laginha Serafim.	56
Quadro 4.4 - Diferenças entre tempos de reverberação experimental e numérico antes da calibração para o auditório.	58

Quadro 4.5 - Coeficientes de absorção sonora iniciais e finais adotados para a calibração do modelo do auditório.	59
Quadro 4.6 - Tempos de reverberação experimental e numérico sem e com calibração do auditório.	60
Quadro 4.7 - Valores de referência de Tempo de Reverberação Médio para reabilitação do Auditório Laginha Serafim.	63
Quadro 4.8 - Tempos de reverberação do auditório para reabilitação com solução inicial fixa.	65
Quadro 4.9 - Tempos de reverberação para o auditório com segunda solução para compor painel de acústica variável.	68
Quadro 4.10 - Tempos de reverberação para o auditório com terceira solução para compor painel de acústica variável,	69
Quadro 4.11 - Valores de Tempo de reverberação médio e RASTI obtidos para a reabilitação com solução fixa e variável.	72

SIMBOLOGIA

A1 – Fonte sonora 1

α – Coeficiente de absorção sonora

$\alpha_{\text{médio}}$ – Coeficiente de absorção sonora médio

CATT – Computer Aided Theater Tecnique

dB – Decibel

f – Frequência

Hz – Hertz

k - constante

L_{Aeq} – Nível sonoro contínuo equivalente

log – Logaritmo

L_p – Nível de pressão sonora

m - metros

m² - metros quadrados

m³ - metros cúbicos

MDF – Medium Density Fiberboard

mm – milímetro

ms – milissegundos

OMS – Organização Mundial de Saúde

P – Pressão sonora

P₀ – Pressão sonora de referência

Pa – Pascal

RASTI – Rapid Speech Transmission Index

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

S_i – Área do material

s - Segundos

Tr – Tempo de Reverberação

Tr_{médio} – Tempo de Reverberação médio

T₆₀ – Tempo de Reverberação médio, baseado no decaimento de 60dB

V – Volume

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e Motivação

No período da Idade Antiga, o arquiteto Marco Vitruvio escreveu no tratado “De Arquitetura” que a arquitetura deve se basear nos três princípios básicos: Firmitas, Utilitas e Venustas, ou seja, que a arquitetura consiste na harmonia entre, respectivamente, a forma, a função e a estética. No entanto, com o passar do tempo após a Revolução Industrial e da Globalização, a sociedade foi impactada com o crescente uso da tecnologia e com isso criou-se uma nova forma de viver nas cidades, gerando uma nova relação entre as pessoas e o espaço. Tendo em vista as novas formas de relacionar com o ambiente, os três princípios básicos foram ajustados a atual demanda social, sendo a função do espaço um dos princípios mais explorados atualmente na arquitetura.

Sendo a arquitetura parte da relação direta entre o usuário do espaço e a função do mesmo, há uma crescente busca por uma arquitetura dinâmica, na qual o espaço se modifique de acordo com a necessidade do utilizador. Diante disso, a definição de arquitetura flexível segue a ideia de que um determinado espaço pode variar seu uso de acordo com modificações na forma, volume e estética, através de alterações no interior do ambiente, ou seja, tem o objetivo de criar espaços multifuncionais que agregam mais de uma função em um mesmo espaço (Guedes, 2016).

Apesar deste conceito não ser novo, a criação de espaços híbridos tem se tornado algo constante na sociedade atual, modificando a relação homem X espaço, e trazendo novos usos a espaços obsoletos. A multifuncionalidade de espaços tem sido praticada principalmente em salas, ou seja, tem-se criado salas multiusos que mesclam a utilização como auditório, teatro, música e outros.

Esses espaços multifuncionais devem ser relacionados entre si de forma equilibrada, mantendo as noções de conforto aplicados aos ambientes quando estão separados. Cada ambiente possui requisitos diferentes de conforto, com isso, deve-se atentar, principalmente, a questão do tratamento sonoro, já que o ruído é um dos principais problemas que gera incômodo afetando na escolha das pessoas na utilização do espaço.

Diante desse contexto, a acústica é um dos princípios essenciais a ser estudado e aplicado nesses espaços, de forma a criar uma sala multifuncional harmônica. O condicionamento sonoro das salas multiusos é uma forma de promover conforto acústico ao ambiente, porém há

a necessidade de condicionar o mesmo de acordo com os critérios acústicos de cada uso, como, o tempo de reverberação. O tempo de reverberação (T_r) é um parâmetro que varia de acordo com os revestimentos, o volume do espaço, a frequência e a utilização do ambiente, sendo este um dos requisitos a ser seguido na elaboração de um projeto de sala multiuso. Na Figura 1.1 abaixo, pode-se exemplificar os valores de tempo de reverberação adequado para diversos tipos de salas em relação ao volume do ambiente (Tadeu at al, 2010).

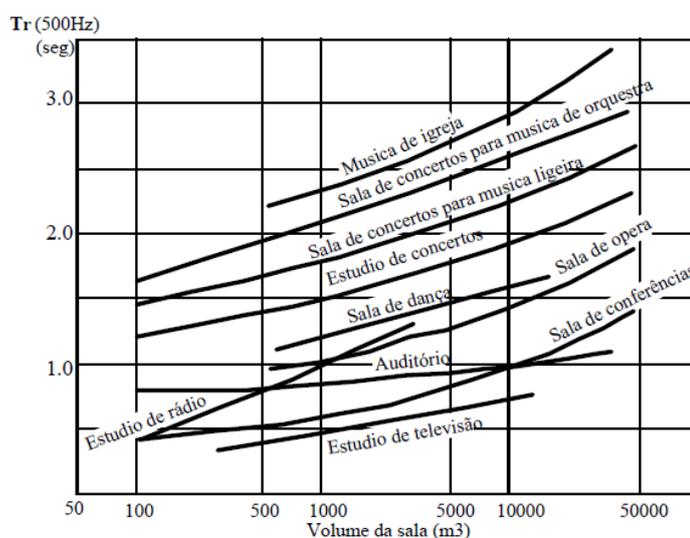


Figura 1.1 - Tempo Ótimo de reverberação, a 500Hz, para diferentes utilizações (Tadeu at al, 2010).

Como foi dito, o conforto acústico desses espaços multifuncionais depende da junção de diferentes requisitos acústicos de acordo com cada tipo de uso do espaço, muitas vezes soluções tradicionais não cumprem essas exigências. Com isso, há a necessidade de explorar novas áreas da acústica para auxiliar no cumprimento dessas novas demandas, sendo assim, a acústica variável é uma possibilidade de solução para o cumprimento desses requisitos acústicos. Através da acústica variável se expande as possibilidades de habilitar espaços a terem usos diferentes, pois a partir dos sistemas que a compõem é possível adaptar ambientes garantindo um conforto acústico.

Baseado no ramo da acústica variável, neste trabalho são estudados os materiais e soluções tradicionais utilizados nas salas, e o que há de inovação do mercado nesta área da acústica ajustável. Visto que a maioria das soluções existentes no mercado não possuem tanta preocupação com o design das soluções, este se torna um ponto de partida na implementação de uma solução de painel acústico reconfigurável. Como o fator estético é um dos principais na escolha dos arquitetos, é estudado e avaliado o comportamento acústico de uma solução de reabilitação com o conceito de acústica variável que agregue forma, função e, principalmente estética à solução, fornecendo conforto acústico de salas.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho consiste na realização de um estudo prévio para o desenvolvimento de um painel acústico reconfigurável que permita a variação de absorção sonora, que gere ganhos no condicionamento acústico e na estética de salas. Este painel com acústica variável terá seu desempenho acústico analisado de acordo com as possibilidades de configurações que o mesmo pode ter, atuando em dois estudos de caso hipotéticos, o Anfiteatro AFD3.1 e o Auditório Laginha Serafim. E com isso, serão analisados os resultados obtidos dos parâmetros acústicos existentes, através de modelos de simulação no software CATT Acoustic, comparando com bibliografias e legislação portuguesa vigente no Decreto-Lei nº 96 de 9 de Junho de 2008, denominado Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE).

1.3 Estrutura da Dissertação

O presente documento, ao longo de seus seis capítulos, apresenta a avaliação do desempenho acústico a partir da reabilitação utilizando o conceito de acústica variável do Anfiteatro AFD 3.1 e do Auditório Laginha Serafim, existentes no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

No Capítulo 1, é feito um enquadramento do trabalho, mencionam-se os objetivos e é descrito de forma sucinta a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica em que expõe os principais conceitos teóricos que dão embasamento sobre o tema. Ainda neste capítulo, é realizada de forma sucinta uma apresentação dos parâmetros de avaliação acústica utilizados nesta dissertação e seus respectivos valores de referência.

No Capítulo 3, apresenta-se o primeiro estudo de caso, o Anfiteatro AFD3.1, descrevendo os materiais, condicionantes acústicas e procedeu-se a modelagem e calibração do modelo numérico. Ainda neste capítulo, apresenta-se a avaliação do comportamento acústico da solução de reabilitação com o conceito de acústica variável para as diferentes ocupações da plateia do auditório.

No Capítulo 4, apresenta-se o segundo estudo de caso, o Auditório Laginha Serafim, descrevendo os materiais, condicionantes acústicas e procedeu-se a modelagem e calibração do modelo numérico. Ainda neste capítulo, apresenta-se a avaliação do comportamento acústico da solução de reabilitação com o conceito de acústica variável para as diferentes utilizações propostas para o auditório.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões de todo o trabalho desenvolvido.

Por fim, o documento é finalizado com a listagem das referências bibliográficas e anexos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Condicionamento Acústico Interior de Salas

O condicionamento acústico é o principal elemento para habilitar um ambiente a ter um conforto acústico. Para se condicionar acusticamente um ambiente, deve-se ter em conta a utilização que este ambiente terá e os parâmetros que devem ser seguidos para a sala ter uma boa acústica. Com o conhecimento desses fatores, é possível adequar uma sala ao seu uso a partir de modificações nos materiais das superfícies que a compõe de forma a cumprir o tempo de reverberação ideal.

A escolha de materiais a serem aplicados nas superfícies de salas devem levar em consideração o que se pretende provocar com o som, ou seja, se é necessário que a energia sonora seja refletida, absorvida ou difusa. De acordo com Cox e D'Antônio (2009), o som ao se encontrar com uma superfície pode ser refletido, absorvido e transmitido, dependendo das propriedades acústicas que a superfície tem, e o som refletido ainda pode ser espalhado em um ambiente através de uma reflexão difusa (Figura 2.1).

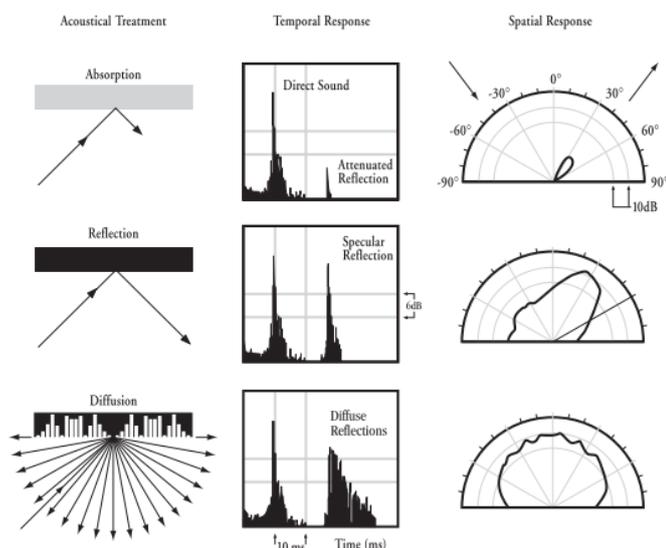


Figura 2.1 - Características de materiais absorventes, refletores e difusores (Cox e D'Antônio, 2009).

Como dito anteriormente, as reflexões apenas são aproveitáveis numa sala se estas fizerem parte das primeiras reflexões até 100ms, e após esse tempo devem ser eliminadas. Uma das

formas de se eliminar as reflexões tardias que geram defeitos acústicos na sala é através da inserção de materiais com absorção, ou seja, materiais capazes de atenuar a energia sonora refletida. Já no caso da difusão sonora, os materiais têm a capacidade de dispersar a energia sonora refletida em direções aleatórias, que muitas vezes se torna necessário para não focalizar o som.

2.2 Absorção Sonora

Para condicionar espaços é necessário a especificação de materiais de acordo com a utilização que a sala terá e com o quão reverberante o som deverá ser de acordo com o uso. Com isso, para tornar a sala condizente com a sua função, geralmente é necessário aplicar absorção sonora ao ambiente.

2.2.1 Conceito e Propriedades

A absorção sonora consiste na dissipação de energia sonora num ambiente, podendo ser obtida através de materiais utilizados como revestimentos e pelo recheio presente no ambiente, como mobiliário e os usuários. Cada material possui a capacidade de reduzir a energia sonora em um ambiente, diminuindo o tempo de reverberação e eliminando os defeitos acústicos no ambiente, porém o que define a quantidade de energia sonora a ser reduzida são as propriedades, espessura, ângulo de incidência e frequência em que são expostos (Isbert, 1998).

Essa capacidade de um material de absorver a energia sonora incidente é medido através de um coeficiente de absorção (α) que pode ser obtido por ensaios em laboratórios a partir de procedimentos descritos em normas. Como dito anteriormente, esses coeficientes variam conforme as propriedades, como, a espessura, densidade, porosidade, e características em que os mesmos foram condicionados e dispostos em salas.

Os coeficientes de absorção dos materiais variam entre 0 a 1, quando o coeficiente é igual a 0 ($\alpha=0$), significa que não há absorção, ou seja, é uma superfície refletora. E quando o coeficiente é igual a 1 ($\alpha=1$), significa que há 100% de absorção, ou seja, toda a energia sonora incidente é absorvida pela superfície.

Como dito anteriormente, os materiais absorventes ao ser dispostos em ambientes de diversas formas que podem modificar o seu coeficiente de absorção. Um material ao ser colocado diretamente colado a uma superfície terá um coeficiente de absorção distinto, se o mesmo for

colocado com um afastamento da superfície, criando um sistema com o material e uma caixa de ar.

Além disso, o coeficiente de absorção de um material varia seu comportamento de acordo com a frequência sonora em que é utilizado, por exemplo, materiais porosos são mais eficientes em altas frequências, os ressoadores nas médias frequências e as membranas ou painéis ressonantes são mais eficientes nas baixas frequências.

2.2.2 Materiais Porosos ou Fibrosos

Os materiais porosos ou fibrosos são os materiais mais utilizados quando se necessita adicionar absorção em um ambiente. De acordo com Barron (2009), este material é formado por poros ou fibras e partículas de ar em seu interior que com a vibração, auxiliam na dissipação de energia. Alguns exemplos de materiais usualmente utilizados são: a lã mineral, lã de fibra de vidro, lã de rocha, espumas de poros abertos, tecidos e alcatifa, estes são utilizados geralmente como revestimentos ou na composição de um sistema de parede ou teto.

O material poroso tem maior eficiência na absorção sonora nas altas frequências, porém essa eficiência depende também das seguintes características: porosidade, resistividade ao fluxo de ar, tortuosidade e estrutura interna dos poros ou fibras (Ginn, 1978). A porosidade consiste no volume de poros que o material possui em relação ao volume da amostra, sendo neste caso, quanto maior número de poros, maior será a absorção sonora do material em todas as frequências.

A resistividade ao fluxo de ar é uma das principais características do material poroso, segundo Cox e D'Antônio (2009). Este consiste na resistência que o material possui a passagem de ar em relação a sua espessura, sendo considerado um material resistente ao fluxo de ar quando o mesmo possui uma alta resistividade, conseqüentemente, um material com pouca absorção.

A tortuosidade, segundo Mareze (2013), consiste na orientação não uniforme dos poros de acordo com o eixo axial, em relação a propagação da onda sonora. Com isso, quanto maior a tortuosidade dos poros do material, maior será a absorção do mesmo.

Em relação a espessura do material poroso, de acordo com Cox e D'Antônio (2009), na medida que a espessura do material aumenta, a absorção nas baixas frequências também aumenta (Figura 2.2). Segundo os autores citados, pode-se dizer que para obter uma absorção significativa, o material necessita ter no mínimo 1/10 do comprimento de onda incidente, ou ¼ do comprimento de onda para que a absorção sonora seja total.

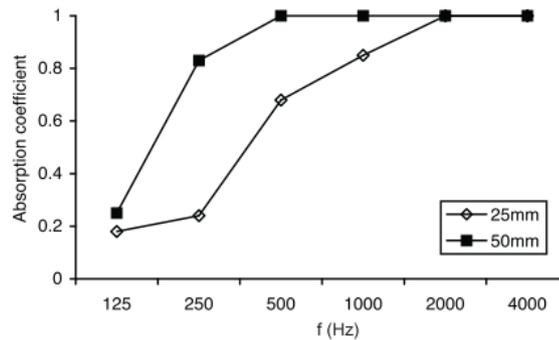


Figura 2.2 - Coeficiente de absorção de um mesmo material para duas espessuras diferentes (Cox e D'Antônio, 2009).

Na figura acima, observa-se que para um mesmo material (lã de rocha), ao aumentar a espessura há uma melhora na absorção nas baixas frequências. No caso do material acima, verifica-se que houve uma melhora tanto na absorção em baixa frequência, quanto nas médias (500Hz e 1000Hz), enquanto as altas frequências permaneceram sem alteração.

2.2.3 Membranas ou Painéis Ressonantes

Existem dois tipos de materiais ressoadores: as membranas ou painéis ressoadores e o ressonador de Helmholtz. A membrana ressoadora consiste em uma placa de um material flexível fixado em um suporte em uma superfície rígida de parede ou teto, que vibra ao ser submetido a uma energia sonora (Figura 2.3). Essa membrana funciona como um sistema de massa-mola, em que o painel é a massa e o espaço de ar entre o painel e a superfície rígida é a mola (Ginn, 1978).

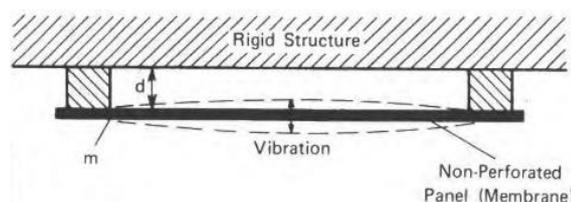


Figura 2.3 - Sistema de membrana ou painel ressonante (Ginn,1978).

Neste sistema com o painel ressonante, há um pico de absorção sonora que ocorre quando a frequência sonora incidente é igual a frequência de ressonância do sistema. Nas frequências seguintes após a frequência de ressonância, o sistema da membrana ressonante tem uma queda na absorção sonora, sendo necessário incrementar o sistema com material absorvente na caixa de ar próximo ao painel para aumentar a faixa de absorção do sistema (Isbert, 1998).

Na Figura 2.4 pode-se observar os diferentes comportamentos que o material poroso e o painel ressonante possuem de acordo com a frequência sonora.

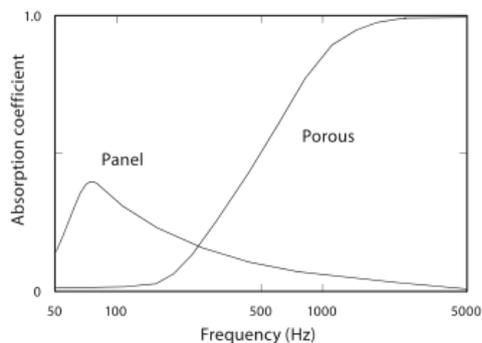


Figura 2.4 - Coeficiente de absorção de painel ressonante e material poroso em função da frequência (Barron, 2009).

As membranas ou painéis ressonantes possuem maior eficiência nas baixas frequências, sendo utilizados em paredes e tetos. Os materiais mais utilizados nesse sistema são placas de madeira compensada, borracha, plástico, entre outros.

2.2.4 Materiais Ressonadores

O outro tipo de material ressonador é ressonador de Helmholtz, que consiste numa abertura com um volume de ar que se conecta com o ar na sala. Quando a energia sonora incide na cavidade em contato com o ar da sala, esta gera vibrações nas partículas de ar na abertura, resultando na absorção da energia sonora.

Como é possível ver na Figura 2.5, essas aberturas geralmente são formadas através da disposição de placas, ou com o uso de painéis com um padrão de orifícios perfurados ou ranhurados que formam um gargalo com um volume entre o painel e a superfície rígida (Ginn, 1978). De acordo com Cox e D'Antônio (2009), os painéis ranhurados são mais utilizados com o objetivo estético quando é necessário esconder os orifícios, desta forma, na superfície aparente há ranhuras espaçadas e ao fundo destas há orifícios.

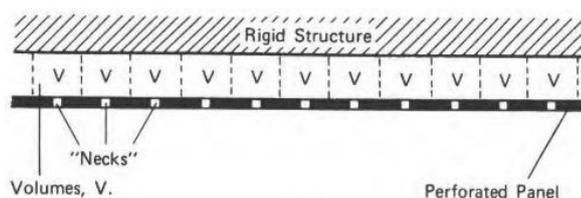


Figura 2.5 - Painel perfurado utilizado como um ressonador de Helmholtz (Ginn, 1978.)

Os ressoadores de Helmholtz mais utilizados são os painéis perfurados ou ranhurados, estes são produzidos em diversos materiais, sendo mais utilizados em madeira compensada, gesso acartonado e chapa metálica. Estes painéis possuem maior eficiência nas médias frequências, sendo geralmente empregados em paredes ou tetos.

Assim como a membrana, os ressoadores de Helmholtz possuem uma queda na absorção nas frequências após a frequência de ressonância, sendo necessário a adição de material absorvente na caixa de ar entre a superfície rígida e o painel (Isbert,1998). A adição de material absorvente na caixa de ar se torna frequente na utilização de painéis ressoadores, pois além de gerar um acréscimo na absorção do sistema, evita com que a energia sonora incidente seja refletida ao encontrar a placa.

A eficiência dos ressoadores de Helmholtz dependem do volume de ar da cavidade, do diâmetro e profundidade da secção da cavidade, do espaçamento das ranhuras e se há material absorvente preenchendo o volume de ar entre o painel e a superfície rígida.

Patraquim et al (2012) ao realizar uma análise experimental da absorção sonora de painéis ranhurados e perfurados em MDF com incorporação de espumas acústicas, concluiu que quanto maior a taxa de perfuração da face visível do painel, maior será a absorção sonora do sistema, devido ao caminho direto do som para a parte interna do sistema.

Godinho et al (2011) avaliou o comportamento acústico de painéis ressonantes com tela acústica em relação a diferentes tamanhos de caixa de ar e posições de material poroso absorvente. Nesta avaliação foi verificado a influência na absorção sonora em uma caixa de ar de 40mm com tela acústica sem material absorvente, com a mesma espessura de caixa de ar e com a adição de material absorvente e com o dobro de espessura de caixa de ar sendo metade vazio e outra metade com material absorvente, em posições junto e separado do painel.

Após tal avaliação realizada em tubo de impedância, verificou-se pelos autores que o painel com caixa de ar com material absorvente e com caixa de ar com o dobro de espessura com material absorvente junto ao painel possuem melhores desempenhos acústicos. Ambas amostras possuem picos de absorção mais elevados, sendo que a segunda possui uma frequência de ressonância mais baixa. Ao comparar, experimentalmente, a localização do material absorvente junto e separado do painel na caixa de ar, verificou-se que o material próximo ao painel possui um pico de absorção sonora maior na frequência de ressonância que o material afastado do painel (Godinho et al, 2011).

Ainda na avaliação realizada pelos pesquisadores acima mencionados, foram obtidos resultados quanto a influência da espessura do painel na absorção sonora. Nesta pesquisa

verificou-se que não houve alterações significativas ao comparar um painel com espessuras de 8mm, 12mm e 16mm, apenas foi constatado que com o aumento da espessura, a frequência de ressonância tende a alcançar frequências inferiores (Godinho et al, 2011).

De acordo com avaliação de Godinho et al (2011) de diferentes telas acústicas coladas no tardo do painel, verificou-se que quanto maior resistência ao fluxo de ar apresentado pela tela, menor o coeficiente de absorção máximo e menor será o piso de ressonância. Com isso, concluiu-se que a tela colada no tardo gera uma grande influência no desempenho do sistema do painel perfurado.

2.3 Difusão Sonora

No condicionamento de espaços, a difusão sonora tem papel essencial em auxiliar o som ao chegar no ouvinte, e possui importância na estética das salas a partir do seu design. A difusão auxilia quando há a necessidade de consertar defeitos acústicos e ainda conservar a energia sonora do espaço, sem que modifique a absorção e o tempo de reverberação na sala. Além disso, ao contrário da reflexão que focaliza o som refletido na mesma angulação do som incidente, a difusão sonora gera um espalhamento aleatório do som no ambiente.

2.3.1 Conceito e Propriedades

A difusão consiste no espalhamento sonoro gerado por uma superfície a partir de um som incidente, podendo ser obtido através de superfícies irregulares ou materiais difusores. A utilização de difusores gera uma dispersão da reflexão reduzindo o nível que retorna ao palco e ainda torna o eco inaudível (Cox e D'Antônio, 2009). Segundo Isbert (1998), a utilização de difusores faz com que a energia sonora reverberante alcance os ouvintes por todas as direções igualmente, principalmente em salas de concertos, gerando uma boa percepção espacial e uma boa acústica no espaço.

O espalhamento sonoro causado pelos difusores depende das características da superfície em que a onda sonora vai incidir. Segundo Cox e D'Antônio (2009), é possível observar a diferença de difusão em superfícies, ao comparar uma onda sonora incidente entre uma superfície plana, uma superfície convexa e um difusor com uma superfície difusora com diversas profundidades (Figura 2.6).

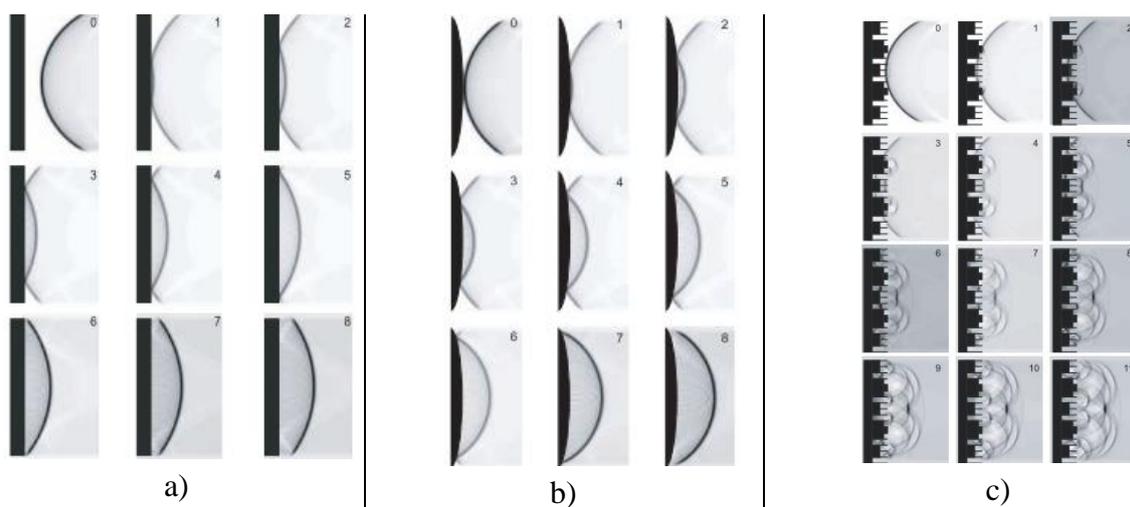


Figura 2.6 - Ondas cilíndrica sendo refletidas a) Em uma superfície plana b) Em uma superfície convexa c) Em uma superfície difusora (Cox e D'Antônio, 2009).

De acordo com Cox e D'Antônio (2009), na Figura 2.6(a) percebe-se que a onda sonora ao encontrar com uma superfície plana é refletida na mesma direção da reflexão especular e com o mesmo ângulo de incidência sem alteração, ou seja, não há dispersão da onda sonora. Já na Figura 2.6(b), observa-se que a onda sonora ao ser refletida se torna mais curvada, porém o espalhamento seria mais perceptível se a superfície tivesse uma curva mais acentuada, sendo muitas vezes algo inviável.

Com isso, se torna necessário utilizar um difusor mais eficiente, como é o caso da Figura 2.6(c), em que mostra o efeito da onda sonora incidente ao encontrar as diversas profundidades no Difusor de Schroeder. A onda sonora ao incidir no material difuso tem diferentes tempos de reflexão devido as diversas profundidades existentes no material, gerando um espalhamento sonoro com um padrão complexo (Cox e D'Antônio, 2009).

É possível medir o comportamento da reflexão incidente em uma superfície através de dois coeficientes diferentes, o coeficiente de difusão e o de espalhamento. De acordo com Cox e D'Antônio (2009), esses coeficientes são uma forma de sintetizar um único parâmetro de uma superfície visto que estes variam de acordo com a posição de fonte e receptor.

Diante disso, tem-se que o coeficiente de difusão (d) avalia a uniformidade da energia sonora refletida, e o coeficiente de espalhamento (s) avalia o espalhamento sonoro de forma não especular em relação a energia sonora total refletida. Enquanto o primeiro tem função de permitir que os projetistas de difusores e de salas tenham conhecimento e possam comparar desempenho dos materiais, enquanto o segundo caracteriza o espalhamento sonoro gerado pela superfície para se inserir em programas para modelagem e elaboração de projetos (Cox e D'Antônio, 2009).

2.3.2 Sistemas Híbridos (Absorção e Difusão)

Outra forma de promover o conforto acústico em salas é através de um sistema misto com materiais com função absorvente e refletora ou difusora. Este tipo de sistema é utilizado quando é necessário modificar o tempo de reverberação e ainda eliminar defeitos acústicos em salas, como o eco, através da difusão. Os sistemas híbridos são geralmente mais eficientes para absorção sonora nas baixas a médias frequências e para a reflexão difusa entre médias a altas frequências.

Um exemplo de material misto é o Binary Amplitude Diffsorber (BAD panel) que consiste em um sistema híbrido com capacidades absorvente e difusoras. Este painel consiste em uma superfície decorativa que envolve uma placa perfurada com características refletoras que se localiza acima do material poroso, geralmente lã mineral (Figura 2.7).

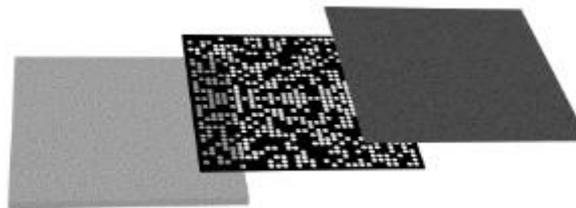


Figura 2.7 - Sistema BAD panel (da esquerda para a direita tem: a lã mineral, o painel perfurado refletor e o material decorativo) (Cox e D'Antônio, 2009).

Os sistemas híbridos, como o mostrado na figura acima, têm sido bastante utilizados devido ao seu desempenho acústico alinhado com o fator estético, que pode substituir os painéis convencionais perfurados. Além disso, este sistema pode ser desenvolvido em vários tipos de materiais tanto para o painel perfurado no interior quanto para os materiais poroso e decorativo.

2.4 Acústica Variável

Há muito tempo que um mesmo espaço é utilizado para diversos usos diferentes, porém há pouco tempo em que os espaços passaram a ser projetados com o objetivo multifuncional, isso ocorreu devido a razões econômicas. Ainda que tenha havido o aumento de projetos de espaços versáteis, a preocupação em modificar as características desses espaços de forma a obter diferentes desempenhos acústicos correspondentes com o seu uso é algo novo. Com

isso, surge a acústica variável para atender e suprir a carência acústica de espaços fechados com múltiplos usos.

A acústica variável nasce da necessidade de adequar a performance sonora de lugares que possuem usos variados e que necessitam de um comportamento acústico específicos para cada utilização, como teatros que são usados como salas de concertos (Isbert, 1998). Neste caso, por exemplo, os teatros e as salas de concertos possuem necessidades de tempos de reverberação e outros parâmetros específicos e diferentes, respectivamente para a oratória e música.

O conceito da acústica variável surge para responder a demanda acústica de espaços multiusos, através da utilização de diferentes coeficientes de absorção e difusão sonora, de acordo com a necessidade do espaço.

Uma das formas de modificar o comportamento acústico das salas é através da alteração do tempo de reverberação no ambiente. Essa alteração pode ser realizada através da alteração tanto de um dos fatores no cálculo do tempo de reverberação, pela modificação do volume da sala e/ou da absorção sonora do ambiente, quanto da inserção de sistemas eletroacústicos.

As modificações físicas que afetam a acústica de diferentes usos devem ser relevantes e substanciais, pois pequenas mudanças não trazem efeitos significativos na percepção acústica e subjetiva do espaço. Com isso, para a acústica variável em ambientes com dois ou mais usos, as modificações no parâmetro do tempo de reverberação para cada uso devem ser relativamente grandes entre eles para serem consideradas eficientes e perceptíveis.

2.4.1 Solução a partir da Variação no Volume da Sala

Dentre as soluções disponíveis na acústica variável para modificar o tempo de reverberação, alterar o volume da sala é uma das possibilidades por trazer ganhos ao T_r sem diminuir a absorção do local.

De acordo com Isbert (1998), a variação do volume da sala pode ser obtida através de quatro possibilidades: a primeira possibilidade consiste na utilização de uma partição móvel vertical, a segunda possibilidade consiste em um sistema com abertura e fechamento de um teto falso, a terceira possibilidade consiste no acoplamento de uma cavidade reverberante à sala e a quarta possibilidade de modificação do volume consiste na utilização de painéis móveis no teto.

Com a primeira possibilidade de variação do volume através da utilização de partição móvel vertical, observa-se na Figura 2.8 e Figura 2.9 que ao utilizar este método, há uma divisão do espaço original em dois que podem ter novos usos, e conseqüentemente há uma redução no tempo de reverberação dos novos espaços gerados. Quanto às alterações nas reflexões úteis com o emprego de repartição móvel vertical, observa-se na Figura 2.8 que na configuração original, as reflexões úteis são menos distribuídas e mais espaçadas, enquanto que na Figura 2.9 com repartição do ambiente, as reflexões úteis são mais evidenciadas pois abrangem grande parte do ambiente.

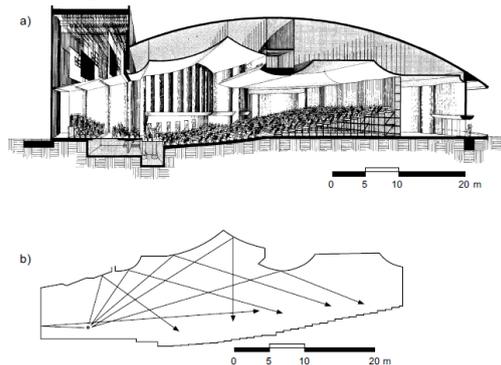


Figura 2.8 - Configuração e representação das reflexões úteis sem repartição móvel vertical no Veterans' Memorial Auditorium, San Rafael (Califórnia) (Isbert, 1998).

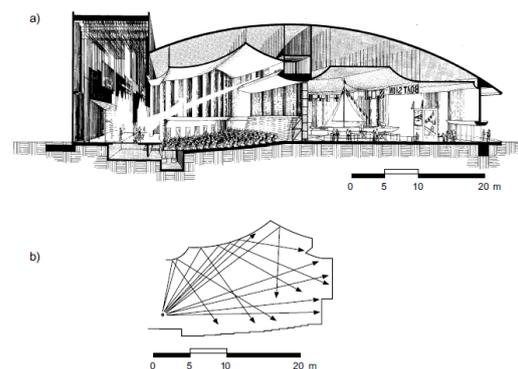


Figura 2.9 - Configuração e representação das reflexões úteis com repartição móvel vertical no Veterans' Memorial Auditorium, San Rafael (Califórnia) (Isbert, 1998).

Esta solução possui algumas adversidades, segundo Isbert (1998), a primeira adversidade é que ao reduzir o volume da sala, também há redução no público presente no ambiente, e a segunda adversidade é em relação ao isolamento acústico entre os ambientes proveniente da partição móvel vertical. O isolamento acústico entre os novos espaços criados é um problema quando há a necessidade de utilizar os espaços ao mesmo tempo, porém pode-se resolver essa questão ao especificar uma partição móvel vertical com alto desempenho no isolamento acústico.

Quanto a segunda possibilidade de modificação no volume da sala, a partir da utilização de sistema de abertura e fechamento de teto falso, é uma solução com acústica variável que possui baixo custo. Neste caso, é necessário que a abertura do teto falso tenha no mínimo 40% de área de aberta para que obtenha uma melhora acústica. Além disso, nesta solução o espaço vazio superior ao teto falso adiciona volume extra na sala, contribuindo na modificação do tempo de reverberação. Neste espaço superior não é indicado a presença de materiais absorventes ou difusores, pois pode não trazer o efeito desejado a sala, sendo necessário que seja um espaço com muita reverberação (Barron, 2009).

A terceira possibilidade de modificação no volume a partir do acoplamento de uma cavidade reverberante à sala é uma solução com um custo maior, e por isso, muitas vezes não é adotada em projetos acústicos. De acordo com Barron (2009), o custo maior se deve porque é construída uma câmara reverberante acoplada ao perímetro da sala principal através de uma porta, que quando aberta acrescenta volume à sala principal (Figura 2.10). A câmara reverberante faz com que a energia sonora seja removida do ambiente e retorne algum tempo depois à sala principal.

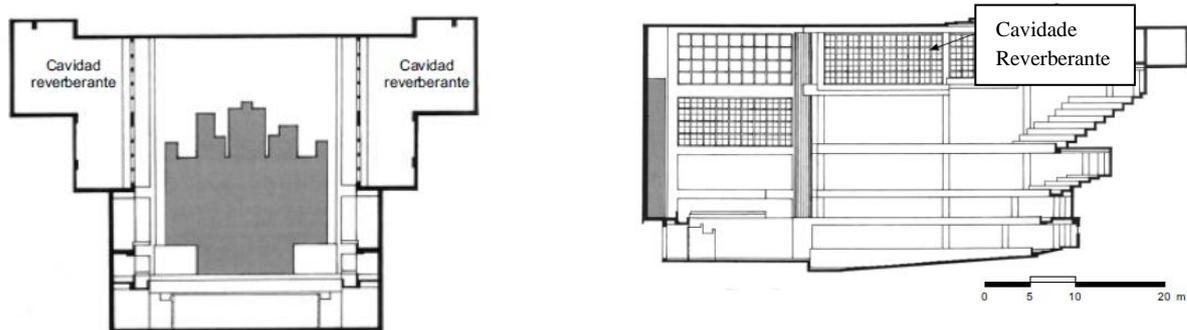


Figura 2.10 - Exemplos de planta e corte de sala com cavidades reverberantes (Isbert, 1998).

Nesta solução com câmara reverberante ao medir o tempo de reverberação, este terá no gráfico um decaimento com duas inclinações, um referente ao T_r na sala principal e outro referente ao T_r nas câmaras reverberantes (Barron, 2009). De acordo com Isbert (1998), esse duplo decaimento será perceptível ao ouvinte quando houver um decaimento sonoro total, que terá a impressão que a segunda reverberação vem de um espaço exterior ou que o ambiente é maior.

A quarta possibilidade de modificação do volume consiste na utilização de painéis móveis suspensos no teto, que ao se mover reduzem o volume da sala e, se necessário, possibilita a exclusão de cadeiras localizadas na parte superior da sala (Figura 2.11). Esta solução de teto móvel é a mais utilizada quando se pretende modificar o tempo de reverberação a partir da variação no volume de salas.

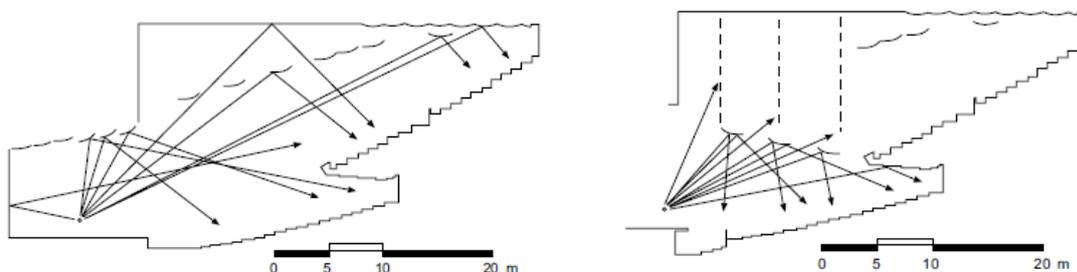


Figura 2.11 - Exemplo na modificação na altura dos painéis suspensos, à esquerda painéis em configuração normal e à direita, painéis mais próximos do público, ocultando cadeiras superiores (Isbert, 1998).

Segundo Isbert (1998), essa solução possui a vantagem de aumentar a energia sonora das primeiras reflexões a partir da aproximação dos painéis ao público. No entanto, a utilização deste sistema possui desvantagem quanto a compatibilização dos painéis com os sistemas de climatização e iluminação presentes no teto.

2.4.2 Solução a partir da Variação na Absorção da Sala

Outra solução da acústica variável para modificar o tempo de reverberação de uma sala, é através sistemas com variação na absorção sonora do ambiente. Para alterar o tempo de reverberação deve-se atentar para a relação entre o volume do espaço e a quantidade de absorção na sala. Essa relação é importante pois em salas pequenas, a variação na absorção sonora é perceptível, porém em salas grandes, é preciso variar muito a absorção sonora do local para ser significativo a alteração no tempo de reverberação (Isbert, 1998).

Para variar a absorção sonora de uma sala, alguns sistemas são utilizados na acústica variável, como: cortinas retráteis, painéis móveis refletores e painéis giratórios. A cortina para ser utilizada na variação de absorção de salas deve possuir densidade elevada. Esta solução possui maior eficiência nas altas e médias frequências, sendo uma solução a ser utilizada na frente de paredes refletoras. De acordo com Isbert (1998), por se tratar de um material fibroso, há uma má absorção sonora nas baixas frequências, porém pode-se amenizar essa má absorção, agregando um afastamento variável entre a parede e cortina.

A segunda solução na variação da absorção da sala é através da utilização de painéis móveis refletores. Os painéis são movimentados lateralmente conforme o que é necessário para o tempo de reverberação do espaço. Este é utilizado como solução de parede e possui material absorvente em 50% de área de parede e painéis refletores nos outros 50%. Quando pretende-se obter o tempo de reverberação mínimo, os painéis refletores são movimentados lateralmente expondo os materiais absorventes, e quando se necessita obter o tempo de reverberação máximo, os painéis refletores se movem de forma a esconder os materiais absorventes (Figura 2.12).

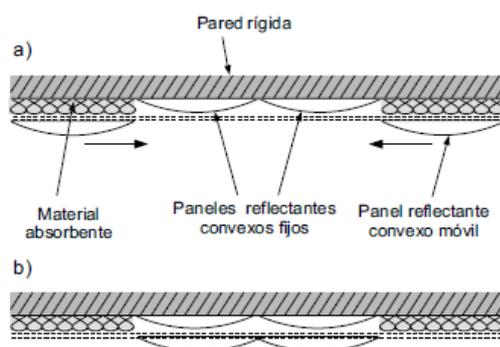


Figura 2.12 - Configurações dos painéis móveis refletivos: a) mínima absorção b) máxima absorção (Isbert, 1998).

Nesta solução, cada painel é movido individualmente, e com isso, pode-se obter diversas configurações diferentes de acordo com a necessidade de absorção sonora no ambiente e o tempo de reverberação desejado. Observa-se que as superfícies refletoras dos painéis são convexas para que aconteça um espalhamento da energia sonora e evite ecos flutuantes.

Os painéis móveis refletivos podem ter diversos tipos de características, sendo outra possibilidade a utilização de painéis refletivos perfurados em frente a um material absorvente colocado nas paredes. Neste caso, os painéis quando sobrepostos expõem o material absorvente e sobrepõem os orifícios criando um ressonador múltiplo, porém quando estão desalinhados, o material absorvente não agrega efeito significativo para sala (Figura 2.13). Apesar de criar um ressonador múltiplo de cavidade com uma máxima frequência crítica, esta solução não apresenta uma grande variação no tempo de reverberação (Isbert, 1998).

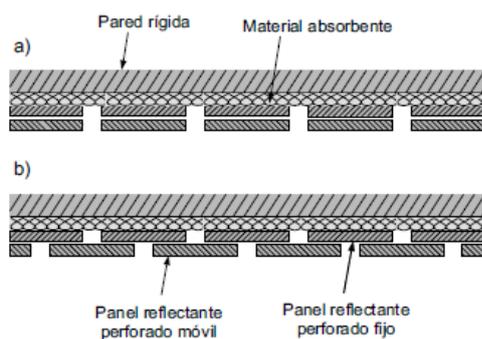


Figura 2.13 - Configurações dos painéis móveis refletivos perfurados: a) painéis sobrepostos formando ressonador múltiplo b) painéis desalinhados escondendo o material absorvente (Isbert, 1998).

A terceira solução na variação da absorção da sala é através da utilização de painéis giratórios que podem ter configuração com rotação 90° , 180° ou 360° , e em cada face um tipo de material que acrescenta efeitos distintos à sala. Nos painéis com rotação de 90° e 180° , uma

face do painel é revestida com material absorvente e outra com material refletor. Na configuração de 90° e 180°, a parede é revestida com, respectivamente, 100% e 50% de material absorvente e a face exposta do painel é escolhida de acordo com o que se pretende em relação ao tempo de reverberação (Isbert,1998).

Na configuração de 90°, quando pretende-se reduzir o tempo de reverberação a partir da exposição máxima de materiais absorventes, o painel é aberto e a parede é exposta deixando a face absorvente a vista. Já quando o painel está fechado, a face refletora com superfície convexa para não causar ecos, é exposta (Figura 2.14). Com este painel com configuração de 90° é possível obter uma maior variação do tempo de reverberação e da área de absorção sonora, devido a maior superfície absorvente disponível no ambiente (Isbert, 1998).

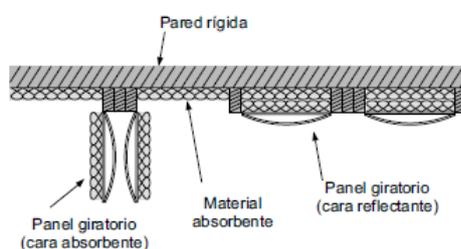


Figura 2.14 - Possibilidades de configuração do painel com rotação de 90° (Isbert,1998).

Na configuração de 180°, quando se necessita utilizar o máximo de absorção sonora do ambiente, os painéis se encontram abertos de forma a expor o material absorvente (Figura 2.15-a). Já quando os painéis estão fechados, as superfícies refletoras são expostas, diminuindo a absorção sonora na sala (Figura 2.15-b). Nesta configuração, observa-se que a superfície refletora possui inclinação de forma a evitar o aparecimento de ecos na sala.

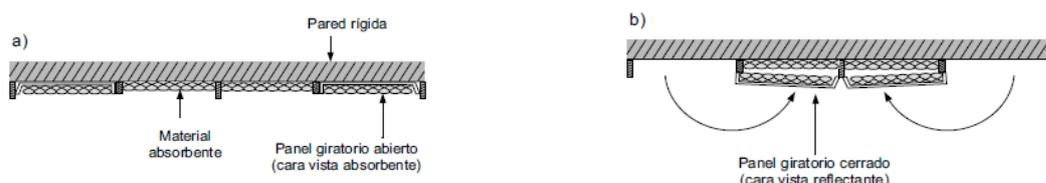


Figura 2.15 - Configurações dos painéis com rotação 180°: a) máxima absorção b) mínima absorção (Isbert, 1998).

Na configuração com rotação 360°, as paredes são revestidas com os painéis giratórios que possuem faces com materiais diferentes e rotacionam a partir do seu eixo. Um exemplo de painel giratório é em forma de prisma que são dispostos de forma a alinhar as faces expostas na sala. No prisma, comercialmente denominado de Trifusor, além da superfície refletora e absorvente, acrescenta-se uma superfície difusora, agregando mais benefícios e versatilidade na configuração da sala.

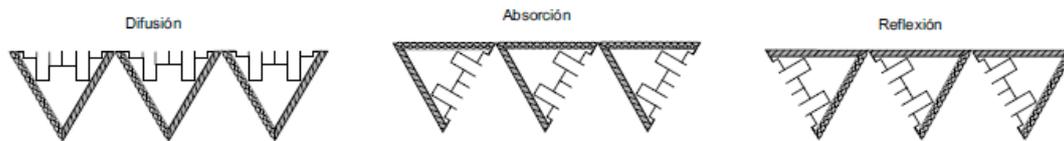


Figura 2.16 - Configurações dos painéis com rotação 360° com faces difusora, absorvente e refletora (Isbert, 1998).

Nesta solução, conforme mostra (Figura 2.16), quando todas superfícies absorventes são expostas, o tempo de reverberação se torna mínimo devido a absorção máxima, já quando todas superfícies refletoras estão expostas, a absorção é mínima. Devido a maior possibilidade de configurações das superfícies na sala, esta solução possui uma maior gama de variação no tempo de reverberação do ambiente.

2.5 Parâmetros Acústicos Para Avaliação De Espaços Fechados

2.5.1 *Nível Sonoro*

O nível de pressão sonora (L_p) é definido como a multiplicação por dez da relação logarítmica entre os quadrados da pressão sonora analisada e a pressão sonora de referência, expressa em decibel (dB), sendo a forma utilizada para traduzir a grandeza de um campo sonoro, em cada banda de frequência (Barbosa, 2009). O nível de pressão sonora é expresso pela equação (2.1):

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right)^2 \quad (2.1)$$

(dB)

onde:

P – Valor eficaz da pressão sonora (Pa);

P_0 – Pressão sonora de referência (2×10^5 Pa)

O nível sonoro contínuo equivalente pode ser apresentado em dB(A), ou seja, usando a malha de ponderação A, que corresponde a uma correção assumindo as bandas de frequência audíveis ao ouvido humano, sendo assim, utiliza-se a expressão (2.2):

$$L_{Aeq} = 10 \log_{10} \left(\sum 10^{0,1 \times (L_{pi} + C_i)} \right), \text{ dB(A)} \quad (2.2)$$

onde:

L_{pi} – representa o nível de pressão sonora em cada uma das bandas de frequência i consideradas, em dB;

C_i – correções relativas à malha de ponderação A.

O nível de pressão sonora é a mais importante medição acústica que permite caracterizar como ocorre a distribuição do som, em ambientes fechados. Diante disso, o nível de pressão sonora, emitido por uma fonte sonora, deve chegar de forma uniforme e com a mesma intensidade em todos os pontos receptores em um espaço fechado.

2.5.2 Tempo de Reverberação

Como já mencionado anteriormente, o tempo de reverberação é um dos parâmetros acústicos mais utilizado para caracterizar a qualidade sonora de espaços fechados (Tadeu et al, 2010). Isbert (1998) define, o Tempo de Reverberação (T_r) como o intervalo de tempo que leva para o nível de pressão sonora, em uma determinada frequência, decair em 60 dB em relação ao nível inicial, desde que a fonte sonora foi interrompida (Figura 2.17).

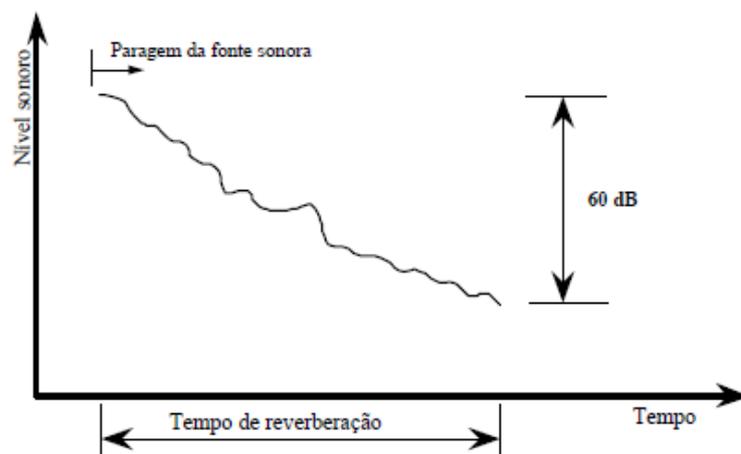


Figura 2.17 - Tempo de Reverberação (Tadeu et al, 2010).

O intervalo de tempo de decaimento da energia sonora depende da forma e do volume da sala, da frequência, dos objetos presentes, da localização dos revestimentos do espaço e na quantidade de absorção sonora presente na sala. O tempo de reverberação varia de acordo com a função do espaço, ou seja, ambientes como salas de aula e auditórios que possuem atividades com oratória precisam de T_r menores, em comparação a ambientes, como igrejas e salas de concerto, que possuem atividades com canto ou orquestra (Egan, 1989). De acordo com Isbert (1998), espaços com um tempo de reverberação alto (igrejas, salas de concerto, etc) são denominados como salas vivas, enquanto que ambientes com tempo de reverberação muito baixo (estúdio de gravação, rádio, etc) são denominados de salas surdas.

2.5.2.1 Métodos Simplificados

Existem diversos métodos analíticos simplificados que auxiliam na previsão do tempo do tempo de reverberação, em que relacionam a área de absorção equivalente presente no ambiente e o volume do mesmo. Os métodos analíticos mais conhecidos foram propostos por Sabine, Eyring e Millington, porém Sabine possui o método mais simples e utilizado no cálculo do tempo de reverberação, como mostra a expressão (2.3) a seguir:

$$Tr = 0.16 V / \sum_{i=1}^n S_i \alpha_i, (s) \quad (2.3)$$

onde:

V – Volume do recinto (m³)

S_i – Área do material i, pertencente à envolvente do recinto (m²);

α_i – Coeficiente de absorção sonora do material i.

A fórmula de Sabine, apesar de simplificada é a mais utilizada, sendo mais rigorosa se o campo sonoro for difuso, os revestimentos estiverem distribuídos uniformemente e com pouca variação da absorção sonora. Esta abordagem possui limitações pois considera coeficientes médios de absorção sonora (α_i) inferiores a 0.20. A fórmula fornece pouco rigor para coeficientes de absorção elevado. No caso o α=1, em teoria deveria resultar em um tempo de reverberação médio igual a 0, o que não acontece ao aplicar na fórmula proposta por Sabine (Tadeu et al, 2010).

Quando o recinto possui os revestimentos uniformemente distribuídos e coeficientes de absorção maiores ou semelhantes, pode-se usar o método proposto por Eyring (Tadeu et al, 2010), conforme expressão (2.4):

$$Tr = 0.07 \frac{V}{-S (1 - \alpha_{\text{médio}})}, (s) \quad (2.4)$$

onde:

S – Área da superfície do recinto (m²)

α_{médio} – Coeficiente de absorção médio da envolvente do recinto.

Já quando o recinto possui uma variedade de materiais com coeficientes de absorção sonora com diferenças significativas, é possível determinar o tempo de reverberação pelo método de Millington, conforme expressão (2.5):

$$Tr = \frac{0,07 V}{- \sum [S \log(1 - \alpha_i)]}, (s) \quad (2.5)$$

Como mencionado anteriormente, ainda que exista esses três métodos analíticos simplificados para a previsão do tempo de reverberação, a fórmula de Sabine é a mais simples e utilizada, apesar de suas limitações.

2.5.2.2 Valores de Referência

Cada ambiente possui um tempo de reverberação adequado em função da atividade realizada, do seu volume e da banda de frequência considerada na utilização, sendo denominado de tempo ótimo de reverberação, como demonstrado na Figura 1.1. Este valor adequado varia em função da frequência sonora, ou seja, frequências altas possuem Tr mais baixos, enquanto frequências baixas possuem Tr mais altos (Tadeu et al, 2010). Na Figura 2.18, mostra o diagrama com a variação do tempo de reverberação adequado em função das frequências sonoras e para o tempo de reverberação para os 500Hz.

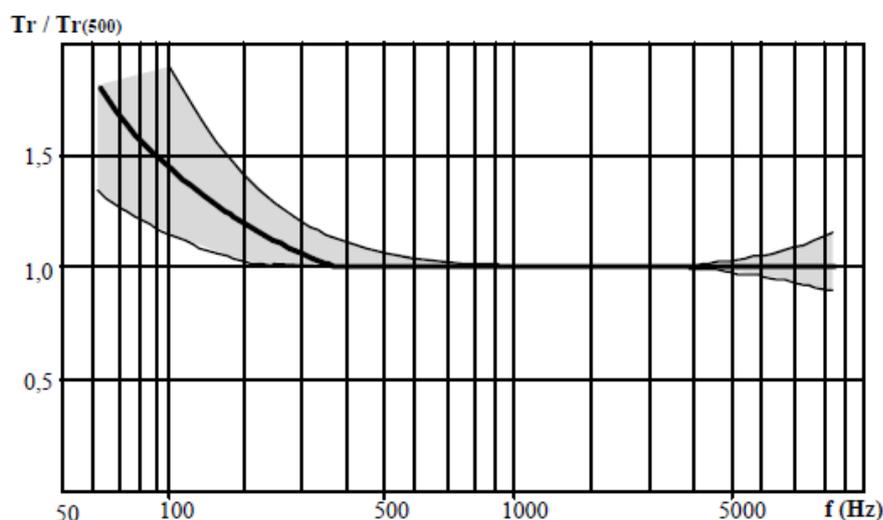


Figura 2.18 - Variação do tempo de reverberação ótimo em função da frequência e para o tempo de reverberação para os 500Hz (Tadeu et al, 2010).

Em Portugal, há o Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios (RRAE), aprovado pelo Decreto-Lei nº 129/2002 de 11/05, alterado pelo Decreto-Lei nº 96/2008, que institui parâmetros de conforto acústicos para edificações, como o tempo de reverberação. De acordo com o artigo 7º, alínea d), o tempo de reverberação (Tr) é calculado pela média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitavas, nas frequências de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz, para

salas de aulas sem ocupação e normalmente mobiliadas deve cumprir a condição proposta na Figura 2.19:

Locais	Tempo de reverberação (500 Hz — 2 kHz)
Salas de aula bibliotecas, salas polivalentes e refeitórios	$T \leq 0,15 V^{1/3}$ [s] (V. artigo 9.º)
Ginásios	

Figura 2.19 - Limite máximo do valor de tempo de reverberação para edifícios escolares, de acordo com o RRAE.

onde V – volume interior do recinto (m³).

De acordo com o artigo 10º-A, alínea a) do RRAE, para ambientes como auditórios e salas de conferências em que a principal função se concentra na oratória, o tempo de reverberação médio (500Hz – 2kHz) deve cumprir a condição proposta na expressão (2.6), quando sem ocupação e normalmente mobiliada.

$$T_r \leq 0,32 + 0,17 \log V, \text{ se } 250 \leq V \leq 9000\text{m}^3, \text{ (s)} \quad (2.6)$$

onde V – volume interior do recinto (m³)

Alguns autores sugerem valores de referência através de expressões que permitem obter o tempo óptimo de reverberação do ambiente, de acordo com o volume da sala e a atividade que será realizada no recinto, como Stephens and Bate (1950) e Arau-Puchades (1997). De acordo com Stephens and Bate (1950), em relação ao tempo de reverberação óptimo (T₆₀), para salas com ocupação, deverá cumprir a condição proposta na expressão¹:

$$T_{60} = K [0.0118 \sqrt[5]{V} + 0.1070], \text{ (s)} \quad (2.7)$$

onde:

V – volume interior do recinto (m³)

k é uma constante, sendo:

k = 4 para discurso

k = 4.5 para ópera

k = 5 para orquestra

k = 6 para canto

¹ Nesta expressão, o autor aconselha o aumento do T₆₀ de 10% em 250Hz, 50% em 125Hz e 100% em 63Hz.

De acordo com Arau-Puchades (1997), o tempo de reverberação médio pode ser calculado em função do volume do ambiente e da atividade na qual pretende-se realizar, sendo assim, este propõe expressões de $Tr_{\text{médio}}$ ótimo máximo e mínimo para cada utilização:

- Para utilização do ambiente como Concerto, tem-se as expressões:

$$\begin{aligned}Tr_{\text{médio}} \text{ óptimo (máximo)} &= 0,60. V^{0,1325} \\Tr_{\text{médio}} \text{ óptimo (mínimo)} &= 0,5125. V^{0,1328}\end{aligned}$$

- Para utilização do ambiente como Câmara, tem-se as expressões:

$$\begin{aligned}Tr_{\text{médio}} \text{ óptimo (máximo)} &= 0,5123. V^{0,1328} \\Tr_{\text{médio}} \text{ óptimo (mínimo)} &= 0,4245. V^{0,1331}\end{aligned}$$

- Para utilização do ambiente como Ópera, tem-se as expressões:

$$\begin{aligned}Tr_{\text{médio}} \text{ óptimo (máximo)} &= 0,509. V^{0,1325} \\Tr_{\text{médio}} \text{ óptimo (mínimo)} &= 0,396. V^{0,1273}\end{aligned}$$

- Para utilização do ambiente como Teatro (oratória), tem-se as expressões:

$$\begin{aligned}Tr_{\text{médio}} \text{ óptimo (máximo)} &= 0,368. V^{0,1505} \\Tr_{\text{médio}} \text{ óptimo (mínimo)} &= 0,264. V^{0,1394}\end{aligned}$$

onde V – volume interior do recinto (m^3)

Diante dos requisitos e valores de referência apresentados, obtém-se os parâmetros de tempo de reverberação médio que serão utilizados na avaliação de desempenho acústico ao longo deste trabalho.

2.5.3 RASTI

A inteligibilidade da palavra é uma forma utilizada para caracterizar a qualidade acústica de salas, pois avalia a compreensão da palavra em um espaço fechado. A inteligibilidade da palavra não é avaliada apenas em sala com função de oratória, e sim, em ambientes diversos onde a mensagem de voz deve ser compreendida. O parâmetro que avalia a inteligibilidade da palavra é o RASTI (“Rapid Speech Transmission Index), que varia numa escala de 0 a 1 a percepção da quantidade de palavras compreendidas em relação a mensagem de voz emitida (Tadeu et al, 2010). De acordo com Tadeu et al (2010), a inteligibilidade equivalente a “0”

significa que é nula, enquanto que equivalente a “1” seria uma inteligibilidade perfeita, porém, na prática estes nunca são atingidos. No Quadro 2.1, mostra os valores de referência do RASTI em relação a inteligibilidade da palavra.

Quadro 2.1 - Relação entre o parâmetro RASTI e a avaliação da inteligibilidade da palavra (Isbert, 1998).

RASTI	Inteligibilidade da Palavra
0,88 – 1	Excelente
0,66 – 0,86	Boa
0,50 – 0,64	Aceitável
0,36 – 0,49	Pobre
0,24 – 0,34	Má

3 ESTUDO DE CASO 1: ANFITEATRO AFD 3.1

Para a análise do comportamento acústico do painel com acústica variável foram escolhidos dois espaços fechados como estudos de caso, ambos utilizados, atualmente, com função de percepção da palavra e oratória. Neste capítulo serão, primeiramente, descritas as características dimensionais, os componentes internos e condicionantes acústicos do primeiro estudo de caso, o Anfiteatro AFD 3.1, existente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Refira-se que a implementação de um painel de acústica variável, enquanto solução de reabilitação não se adapta, na prática, a este género de espaço, pelo que a proposta que se apresenta constitui uma solução hipotética.

Posteriormente, este espaço será modelado utilizando o programa CATT Acoustic, software usado na simulação do condicionamento acústico de espaços fechados, sendo utilizados os coeficientes de absorção sonora utilizados na modelação, obtidos em bibliografia especializada. Após modelagem numérica será calibrado o modelo tendo como base resultados de ensaios experimentais, e com isso será analisado o rigor do modelo através dos parâmetros acústicos como o tempo de reverberação, nível sonoro e RASTI. Após a calibração, será proposta uma reabilitação inicial do anfiteatro e avaliada quanto aos parâmetros de qualidade acústica mencionados.

Finalmente, será proposta uma solução tendo como base o conceito de acústica variável a ser implantada no anfiteatro, que permite manter a qualidade sonora da sala quando ocorrem diferentes percentagens de ocupação. Por fim, será feita uma avaliação do desempenho acústico através da análise dos parâmetros mencionados.

3.1 Caracterização do Objeto de Estudo

3.1.1 Descrição do Anfiteatro

O Anfiteatro AFD 3.1 possui um volume de 418m³ e localiza-se no terceiro pavimento do Departamento de Engenharia Civil, ao lado do Auditório Laginha Serafim. O anfiteatro possui apenas um pavimento com um palco elevado e uma plateia sentada com 182 mesas e cadeiras (Ver planta em Anexo I).

O anfiteatro é utilizado como salas de aulas, conferências e atividades de oratória e possui as seguintes características dimensionais (Quadro 3.1):

Quadro 3.1 - Características dimensionais do Anfiteatro AFD 3.1

Características	Valor
Nº de lugares – Plateia Sentada	182 lugares
Volume (m ³)	418 m ³
Largura Máxima (m)	8,86 metros
Comprimento Máximo (m)	17,60 metros
Pé direito Máximo (m)	3,68 metros

Em relação aos revestimentos e materiais, encontra-se no anfiteatro uma plateia sentada com cadeiras e mesas em contraplacado com espessura 1cm e 3,5cm, respectivamente, duas portas de madeira, teto em gesso acartonado com grande caixa de ar e piso tipo parquet dispostos em pavimento rígido. As paredes do anfiteatro são compostas por dois materiais: o betão (ou alvenaria de tijolo) rebocado e estucado e painéis de contraplacado com 13mm de espessura (Figura 3.1).

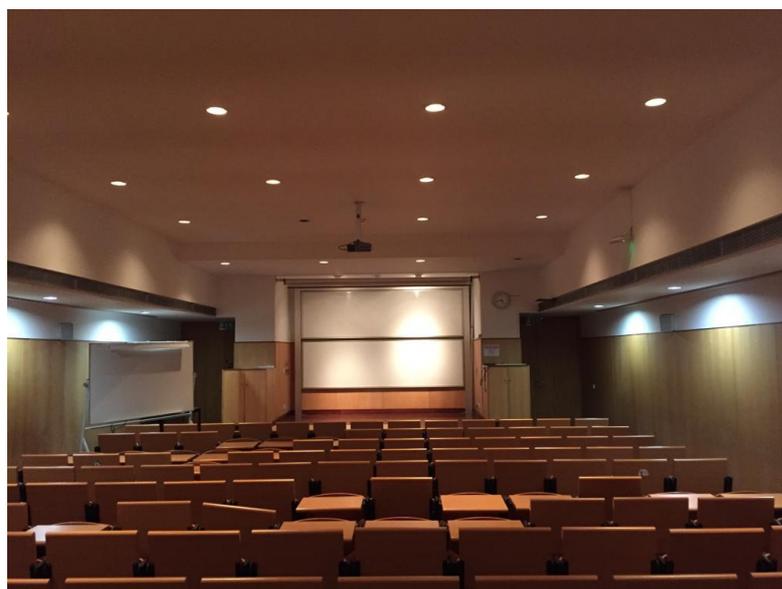


Figura 3.1 – Vista Interna do Anfiteatro AFD 3.1

3.1.2 Descrição das Condicionantes Acústicas

As especificações dos revestimentos acústicos presentes no anfiteatro, e seus respectivos coeficientes de absorção sonora para cada frequência, que são considerados e inseridos na modelagem do anfiteatro no software CATT Acoustic, estão apresentadas no Quadro 3.2. Os

coeficientes das cadeiras e mesas em contraplacado foram obtidos através da área de absorção equivalente (0,02; 0,02; 0,03; 0,04; 0,06; 0,08) (Tadeu et al, 2010), para as bandas de frequências de 125Hz a 4000Hz, tendo em conta a área total ocupada pelas mesas e cadeiras no anfiteatro (97,50m²) a uma altura de 0,50m, e o número de lugares (182 lugares).

Quadro 3.2 – Área e coeficientes de absorção sonora dos materiais existentes no Anfiteatro AFD 3.1

Materiais de Revestimento	Referência	Área Total (m ²)	Coeficiente de absorção sonora (α)					
			Frequência (Hz)					
			125	250	500	1000	2000	4000
Material do Teto								
Teto em gesso cartonado com grande caixa-de-ar	(Lawrence, 1970 apud Barbosa, 2009)	192,49	0,20	0,15	0,10	0,08	0,04	0,02
Material do Pavimento								
Revestimento de piso tipo "parquet", dispostos em pavimento rígido	(Patrício, 2004 apud Barbosa, 2009)	157,62	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
Materiais das Paredes								
Parede em Betão (ou alvenaria de tijolo rebocado e estucado)	(Patrício, 2004 apud Barbosa, 2009)	38,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05
Revestimento em painéis de contraplacado com 13mm de espessura	(Paulino, 2008 apud Barbosa, 2009)	106,15	0,12	0,10	0,08	0,08	0,05	0,05
Material das Portas								
Portas de Madeira	(Patrício, 2004 apud Barbosa, 2009)	11,32	0,12	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
Materiais do Mobiliário								
Cadeiras e Mesas em contraplacado com espessura 1cm e 3,5cm	(adaptado de Tadeu et al, 2010)	97,50	0,04	0,04	0,06	0,07	0,11	0,15

Ao analisar as áreas e coeficientes de absorção apresentados, constata-se que o gesso cartonado e o revestimento em contraplacado possuem maiores áreas de influência nas baixas e médias frequências, enquanto que o piso em parquet e, principalmente, as cadeiras possuem maiores áreas de influência nas altas frequências.

3.1.3 Descrição do Modelo

O software utilizado na modelagem e avaliação acústica é o CATT Acoustic, que funciona através de coordenadas que formam planos para representar as soluções construtivas, para as quais o usuário fornece as propriedades de absorção e difusão do material. Esta versão do

programa, por se tratar de uma versão estudantil (demo) possui algumas limitações, como um dos parâmetros de cálculo, o número de raios (máximo 5000). Os resultados foram obtidos considerando uma fonte sonora omnidirecional com 105dB em cada frequência sonora, localizada no centro do palco; os receptores localizados na plateia a uma altura 0,5m do plano do piso e, a plateia foi considerada como um paralelepípedo ao invés de um plano. Com isso, para a calibração foram considerados os valores obtidos pela Fonte 1 (A1), localizada no centro do palco, e foram posicionados 15 receptores na plateia, sendo divididos em 3 receptores a cada linha dispostos paralelamente ao palco, conforme disposto na Figura 3.2.

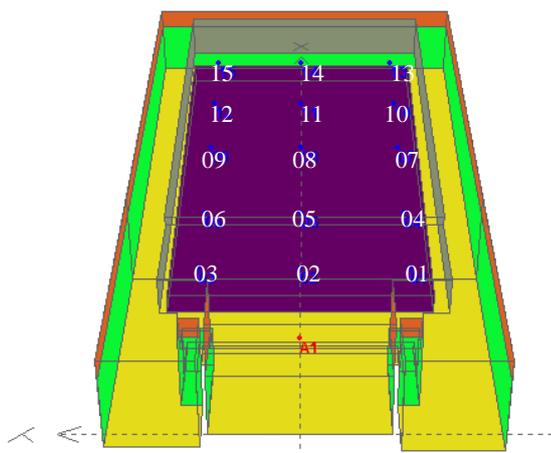


Figura 3.2 - Modelo Anfiteatro AFD 3.1 com posicionamento de Fonte A1 e Receptores do 1 ao 15 na plateia.

Na modelagem dos estudos de caso, além dos dados dos coeficientes de absorção, foram inseridos os coeficientes de difusão dos materiais utilizados. Sendo assim, foi considerado que todos os materiais tem 10% de difusão para cada banda de frequência (0,10; 0,10; 0,10; 0,10; 0,10; 0,10), com exceção das mesas e cadeiras, em que foram considerados os coeficientes de difusão sugeridos pelo manual do programa (0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,50).

3.1.4 Resultados

Após inserção dos coeficientes de absorção acústica dos revestimentos existentes no Anfiteatro AFD3.1 no software CATT Acoustic, foram obtidos os resultados de tempos de reverberação em cada banda de frequência de 1/3 de oitava, e foi calculado o tempo de reverberação médio através da média aritmética das frequências de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz. Diante disso, comparou-se os resultados numéricos obtidos com o modelo, os resultados experimentais medidos in situ (Barbosa, 2009), e com o modelo analítico obtido através da fórmula de Sabine, sendo estes dispostos no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Resultados de Tempo de Reverberação para cada frequência, obtidos para o Anfiteatro AFD3.1.

Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	Tr 500,1000,2000 (s)
Tr (s) - Experimental	1,42	1,83	2,06	2,02	1,78	1,37	1,95
Tr (s) - Numérico s/ calibração	1,24	1,41	1,71	1,75	1,96	1,51	1,81
Tr (s) Sabine	1,05	1,24	1,41	1,40	1,44	1,11	1,42

Com os resultados apresentados acima, pode-se observar na Figura 3.3, os diferentes tempos de reverberação para cada frequência obtidos de forma experimental, numérico e analítico.

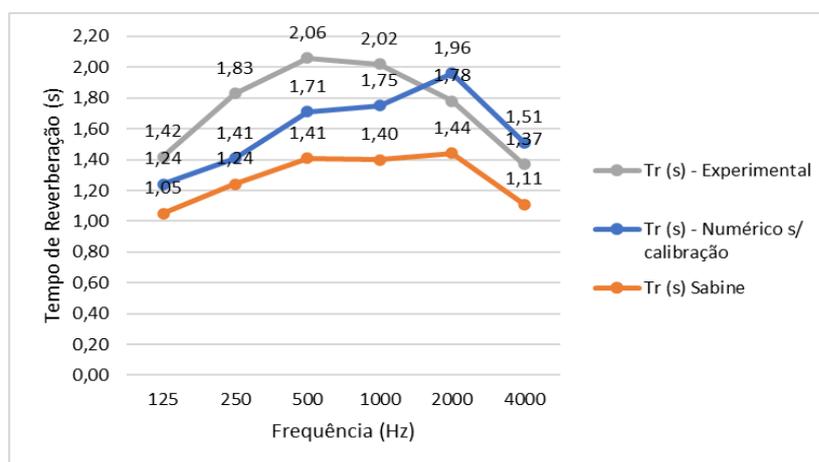


Figura 3.3 – Gráfico com tempos de reverberação dos resultados experimentais, numérico e analítico para o anfiteatro.

Ao comparar os resultados apresentados, pode-se perceber que os tempos de reverberação apresentado pela fórmula de Sabine são inferiores aos calculados numericamente, já que este não conduz bons resultados para ambientes com mais absorção. Sendo assim, o anfiteatro pelo método analítico possui um resultado de $TR_{\text{médio}}$ 0,53s inferior ao $TR_{\text{médio}}$ obtido experimentalmente, e 0,39s inferior ao obtido numericamente.

Ao analisar os dados da Figura 3.3, percebe-se que os resultados do modelo numérico e de Sabine possuem um comportamento semelhante, apresentando valores crescentes até os 2000Hz, e posteriormente, uma queda de tempo de reverberação aos 4000Hz. Já o modelo experimental possui tempos de reverberação crescentes até os 500Hz, e depois decrescente até os 4000Hz. Observa-se que, em todas as frequências, os tempos de reverberação do método experimental possuem valores maiores que o modelo numérico, com exceção das altas frequências (2000Hz e 4000Hz).

Diante dos tempos de reverberação encontrados, observa-se que o Anfiteatro AFD3.1, através do método experimental, possui o $TR_{\text{médio}}$ de 1,95s, sendo considerado um valor elevado para

salas com função de oratória e percepção da palavra, e para cumprir o requisito do RRAE, conforme Figura 2.19. De acordo com o artigo 7 do RRAE, para a sala de aula vazia, o $TR_{\text{médio}}$ (500Hz – 2kHz) deve cumprir a fórmula $T \leq 0,15 \cdot V^{1/3}$ (Figura 2.19), sendo o valor máximo de 1,12s, considerando o volume do anfiteatro. Desta forma, o anfiteatro não cumpre o requisito máximo apresentado, sendo necessária uma reabilitação de forma a adicionar materiais absorventes na sala para reduzir o tempo de reverberação, e melhorar a inteligibilidade do ambiente. Neste caso, se faz necessário a calibração do modelo para que o mesmo tenha configurações próximas à situação real do Anfiteatro AFD3.1.

3.2 Modelagem Numérica e Calibração

3.2.1 Calibração do Modelo

Após a verificação de que o modelo não se assemelha a configuração real do anfiteatro, foi necessário realizar a calibração do modelo para que os coeficientes de absorção sonora se aproximem da situação existente (experimental). Para realizar a calibração de forma a trazer precisão ao modelo, identificaram-se as diferenças (ΔTr), em segundos, entre os tempos de reverberação do modelo experimental e numérico (Quadro 3.4).

Quadro 3.4 - Diferenças entre tempos de reverberação experimental e numérico antes da calibração para o anfiteatro.

Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Tr (s) - Experimental	1,42	1,83	2,06	2,02	1,78	1,37
Tr (s) - Numérico s/ calibração	1,24	1,41	1,71	1,75	1,96	1,51
ΔTr (s)	0,18	0,42	0,35	0,27	-0,18	-0,14

Conforme mostra no quadro acima, existem grandes diferenças entre o modelo numérico e experimental, sendo a diferença máxima de 0,42s na frequência de 250Hz e a mínima de 0,14s na frequência de 4000Hz. Visto que cada material existente no anfiteatro possui diferentes influências de acordo com a frequência, a calibração foi realizada de forma a modificar os coeficientes de absorção em cada frequência, de acordo com o efeito que o material conduz sobre o ambiente.

Tendo em vista a área de absorção equivalente em cada frequência, como ponto de partida para determinar os revestimentos a terem o coeficiente de absorção modificados, percebeu-se que nas baixas e médias frequências, a maior influência é do teto em gesso cartonado com grande caixa de ar e dos painéis em contraplacado. Já em relação às altas frequências, o teto em gesso cartonado com grande caixa de ar, o piso em parquet e, principalmente, as cadeiras e

mesas em contraplacado tem maiores influências. Diante disso, alteraram-se os coeficientes de absorção sonora, conforme Quadro 3.5, que mostra os valores iniciais e finais, ou seja, respectivamente, sem calibração e com calibração.

Quadro 3.5 - Coeficientes de absorção sonora iniciais e finais adotados para a calibração do modelo do anfiteatro.

Materiais de Revestimento	Referência	Coeficiente de absorção sonora (α)					
		Frequência (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Material do Teto							
Teto em gesso cartonado com grande caixa-de-ar	(Lawrence, 1970 apud Barbosa, 2009)	0,20	0,15	0,10	0,08	0,04	0,02
Coeficientes de absorção finais:		0,18	0,11	0,07	0,07	0,05	0,04
Material do Pavimento							
Revestimento de piso tipo "parquet", dispostos em pavimento rígido	(Patrício, 2004 apud Barbosa, 2009)	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
Coeficientes de absorção finais:		0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
Materiais das Paredes							
Parede em Betão (ou alvenaria de tijolo rebocado e estucado)	(Patrício, 2004 apud Barbosa, 2009)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05
Coeficientes de absorção finais:		0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05
Revestimento em painéis de contraplacado com 13mm de espessura	(Paulino, 2008 apud Barbosa, 2009)	0,12	0,10	0,08	0,08	0,05	0,05
Coeficientes de absorção finais:		0,10	0,09	0,07	0,06	0,05	0,05
Material das Portas							
Portas de Madeira	(Patrício, 2004 apud Barbosa, 2009)	0,12	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
Coeficientes de absorção finais:		0,12	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
Materiais do Mobiliário							
Cadeiras e Mesas em contraplacado com espessura 1cm e 3,5cm	(adaptado de Tadeu et al, 2010)	0,04	0,04	0,06	0,07	0,11	0,15
Coeficientes de absorção finais:		0,04	0,04	0,06	0,07	0,12	0,16

Após inserção dos novos dados de coeficientes de absorção sonora calibrados no CATT Acoustic, procedeu-se ao novo cálculo numérico obtendo novos resultados de tempo de reverberação. Sendo assim, o $TR_{\text{médio}}$ do modelo numérico calibrado resultou em 1,92s, ou seja, obteve uma diferença de 0,03s do valor resultante do modelo experimental. No Quadro 3.6, observam-se as diferenças entre tempos de reverberação médio experimental e numérico sem e com calibração e em todas as frequências.

Quadro 3.6 - Tempos de reverberação experimental e numérico sem e com calibração do anfiteatro.

Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	Tr 500,1000,2000 (s)
Tr (s) - Experimental	1,42	1,83	2,06	2,02	1,78	1,37	1,95
Tr (s) - Numérico s/ calibração	1,24	1,41	1,71	1,75	1,96	1,51	1,81
Tr (s) - Numérico c/ calibração	1,36	1,71	2,02	1,96	1,78	1,36	1,92
Δ Tr (s)	0,06	0,12	0,04	0,06	0	0,01	0,03

Como mostra o quadro acima, após ajustes de coeficientes de absorção percebe-se que os valores de tempo de reverberação calibrados se aproximam mais dos valores experimentais, sendo a diferença máxima entre eles de 0,12s a 250Hz, e mínimo de 0s a 2000Hz. Na Figura 3.4, pode-se observar as linhas gráficas dos tempos de reverberação antes e após calibração em relação ao experimental.

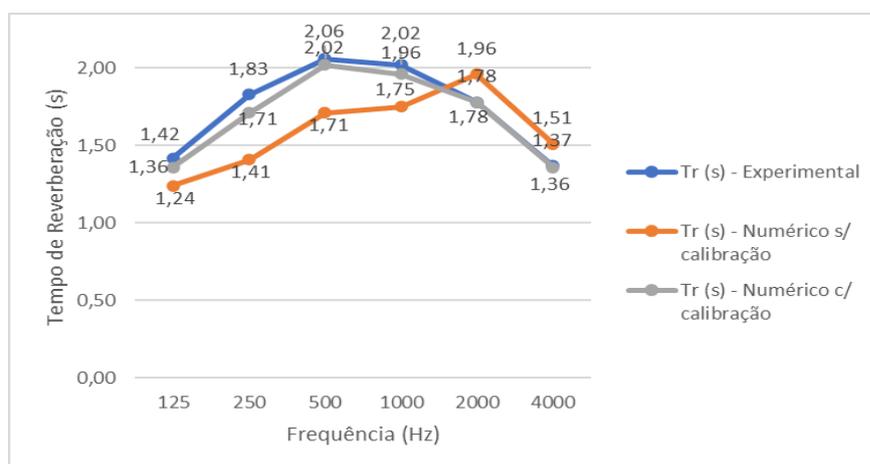


Figura 3.4 – Gráfico com os tempos de reverberação experimental, sem e com calibração do anfiteatro.

Analisando a figura acima, nota-se graficamente que os valores numéricos após a calibração se aproximaram dos valores experimentais, ou seja, tendo valores crescentes até os 500Hz e decrescentes até os 4000Hz. Além disso, conclui-se que os valores adotados na calibração, conduzem a bons resultados que condizem com a real situação do anfiteatro, já que a diferença entre os $Tr_{médio}$ é de 0,03s, sendo assim, considerou-se o modelo numérico como calibrado.

3.2.2 Análise Numérica do Modelo

Após calibração do modelo em relação ao tempo de reverberação, avaliou-se o desempenho acústico do modelo do anfiteatro, sem ocupação, para os parâmetros de nível sonoro e para o

índice RASTI referente a inteligibilidade da palavra. Os resultados obtidos foram comparados com os valores encontrados no modelo numérico sem calibração e com os resultados obtidos experimentalmente por Barbosa (2009).

Em relação ao nível sonoro, comparou-se apenas as diferenças de níveis sonoros entre as primeiras e últimas fileiras do anfiteatro, ou seja, para as posições de receptores R1-R13, R2-R14 e R3-R15, conforme mostra Figura 3.5.

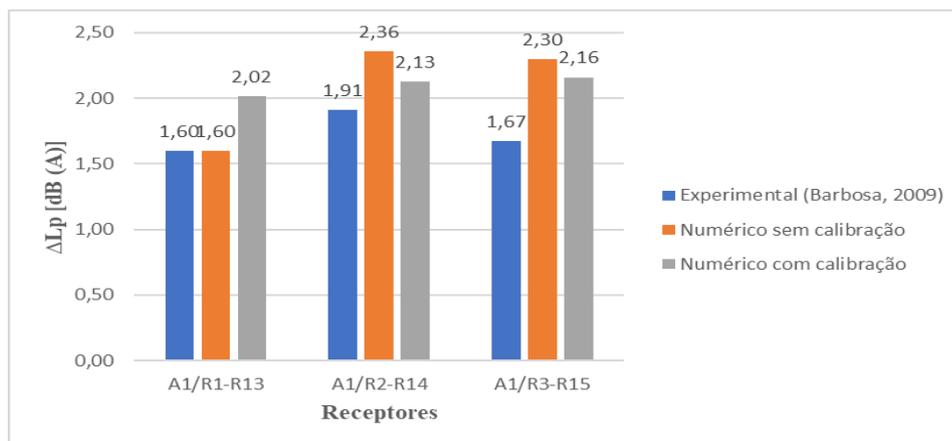


Figura 3.5 - Diferenças entre níveis sonoros entre receptores nas primeiras e últimas fileiras do anfiteatro.

Ao analisar a Figura 3.5, observa-se que as diferenças entre níveis sonoros (Δ dB) dos receptores da primeira e última fileira são maiores para os modelos numéricos sem e com calibração, do que em relação aos valores experimentais, com exceção dos receptores (R1-R13) que possuem valores semelhantes para o modelo experimental e o sem calibração. Além disso, observa-se que o modelo numérico com calibração possui um Δ dB uniforme entre as primeiras e últimas fileiras, assim como o modelo experimental. Apesar dos resultados das diferenças de níveis sonoros dos modelos numéricos sem e com calibração serem superiores, considera o modelo proposto como satisfatório.

Relativamente ao índice de inteligibilidade da palavra RASTI, os resultados foram obtidos comparando os modelos numéricos com e sem calibração com o método experimental para todos os 15 receptores, uma fonte sonora (F1) e o anfiteatro vazio, conforme apresentados na Figura 3.6.

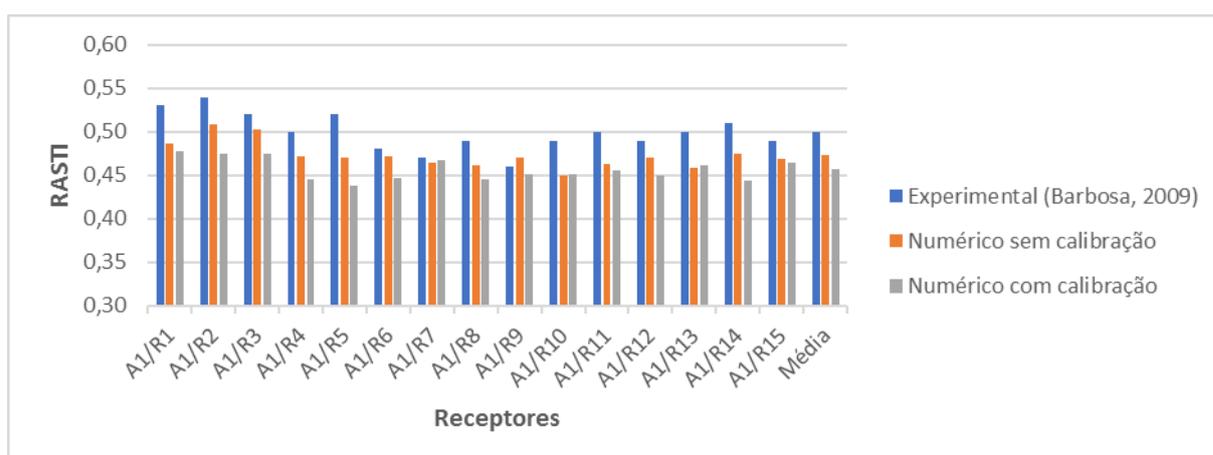


Figura 3.6 - Valores do índice RASTI obtidos através dos modelos numéricos com e sem calibração e do método experimental do anfiteatro.

Verifica-se que apesar da calibração do modelo numérico, este possui o valor médio de 0,46, enquanto que o modelo numérico sem calibração possui valor médio de 0,47s, e o método experimental possui valor médio de 0,50, apresentando então uma diferença de 0,04 entre o modelo experimental e o com calibração. Vale ainda a pena ressaltar que, apesar de comparar os resultados de RASTI entre o experimental e numérico, os valores obtidos pelo calculado geralmente são mais pessimistas que os valores obtidos experimentalmente. Observa-se ainda que em todos os modelos, há menor diferença de índices RASTI nos receptores localizados no centro da plateia (R7, R8 e R9). Diante disso, o modelo numérico calibrado foi considerado razoável quanto a este parâmetro de qualidade sonora.

3.3 Solução com o Conceito de Acústica Variável – Anfiteatro AFD 3.1

Para a reabilitação do anfiteatro, definiu-se que o ambiente deverá ter uma solução com o conceito de acústica variável, ou seja, uma solução que consiga variar a absorção sonora do anfiteatro em função da quantidade de público existente na plateia, já que a presença de pessoas influencia na absorção do ambiente. Essa variação da absorção ocorrerá através de um painel tridimensional em formato de prisma, com 60cmx60cm do piso até o teto, que será utilizado como revestimento de parede e, que deverá fornecer diferentes absorções em cada uma de suas faces, conforme mostra a Figura 3.7.

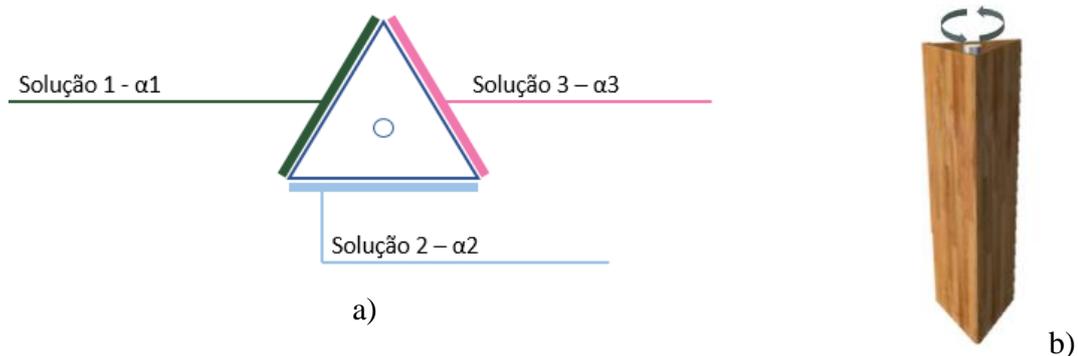


Figura 3.7 - Esquema da solução com conceito de acústica variável. a) Esquema em planta das faces do painel tridimensional. b) Esquema 3D da solução do painel

Como mostra a figura acima, o painel tem um eixo central que fornece a rotação do prisma em 360°, e que possibilita a visualização das três faces, sendo que cada uma das faces possui uma solução de revestimento que fornece um tipo de absorção sonora diferente para o ambiente. Diante disso, determinou-se que os revestimentos presentes na face serão em placas de madeira ranhuradas que além das propriedades acústicas já mencionadas anteriormente, agregam uma boa estética ao ambiente.

A variação da absorção sonora proporcionada pelas três soluções diferentes é necessária devido a variação do público que diminui o tempo de reverberação a medida em que aumenta a ocupação. Com isso, definiu-se que as faces do painel devem corrigir o tempo de reverberação de acordo com a ocupação de 1/3, 2/3, 3/3 da plateia do anfiteatro e para a sala vazia. A correção do tempo de reverberação do anfiteatro se faz necessário pois o anfiteatro não é considerado com uma boa percepção da palavra, já que há uma grande reverberação no ambiente.

Com isso, visto os requisitos regulamentares propostos no RRAE (2008), mencionados anteriormente, determina-se os valores de referência de $Tr_{\text{médio}}(500\text{Hz}, 1000\text{Hz} \text{ e } 200\text{Hz})$ para ambientes com função de oratória com base na equação existente na Figura 2.19, para o anfiteatro vazio. Sendo assim, calculando o $Tr_{\text{médio}}$ através da equação mencionada, tem-se para o anfiteatro vazio, considerando seu volume de 418m³, um valor limite de 1,12s. E para o anfiteatro ocupado, considerou-se fórmula (2.7) do tempo ótimo de reverberação (Stephens and Bate, 1950) com a constante $k=4$ para discurso, sendo assim, considerando o volume do anfiteatro, o tempo de reverberação limite será 0,78s.

3.3.1 Variação do Ocupação

Conforme dito anteriormente, as diferentes absorções do painel têm o objetivo de ajustar a absorção sonora e o tempo de reverberação da sala, conforme a variação do público presente na plateia, visando o cumprimento dos requisitos regulamentares e valores de referência sugeridos. Com isso, calculou-se a influência da variação do público no anfiteatro, a fim de obter a quantidade de absorção sonora gerada pela presença de pessoas na plateia.

Para calcular o modelo com a variação de ocupação, primeiramente, definiram-se os coeficientes de absorção das cadeiras ocupadas, para cada banda de frequência, a partir da área de absorção equivalente de uma cadeira ocupada (0,18; 0,24; 0,28; 0,33; 0,37; 0,39) (Tadeu et al, 2010), em função da área de ocupação e número de pessoas na plateia. Conforme consta no Quadro 3.7 abaixo, observa-se os coeficientes de absorção adotados de acordo com a variação de ocupação, a área de ocupação e número de pessoas.

Quadro 3.7 - Valores de coeficientes de absorção sonora conforme a variação da ocupação da plateia do anfiteatro.

Variação da ocupação da plateia do Anfiteatro AFD3.1.	Nº de pessoas	Área de ocupação (m ²)	Coeficiente de absorção sonora (α)					
			125	250	500	1000	2000	4000
Lugares ocupados								
1/3 da plateia (Cadeiras da Frente)	52	30,99	0,30	0,40	0,47	0,55	0,62	0,65
2/3 da plateia (Cadeiras da Frente e Meio)	117	62,19	0,34	0,45	0,53	0,62	0,70	0,73
3/3 da plateia (Lotação Total)	182	97,50	0,34	0,45	0,52	0,62	0,69	0,73
Lugares Vazios								
Cadeiras sem ocupação (Vazias)	0	97,50	0,04	0,04	0,06	0,07	0,12	0,16
1/3 da plateia vazia (Cadeiras do Fundo)	65	35,31	0,04	0,04	0,06	0,07	0,11	0,15
2/3 da plateia vazia (Cadeiras do Fundo e do Meio)	130	66,51	0,04	0,04	0,06	0,08	0,12	0,16

Para efeito de cálculo foi considerado uma ocupação regular da sala, ou seja, quando a sala está com a plateia 1/3 ocupada esta ocupação será nas primeiras 4 fileiras da plateia, e, quando está com a 2/3 da ocupação são consideradas as 9 primeiras fileiras, conforme mostra o esquema na Figura 3.8.

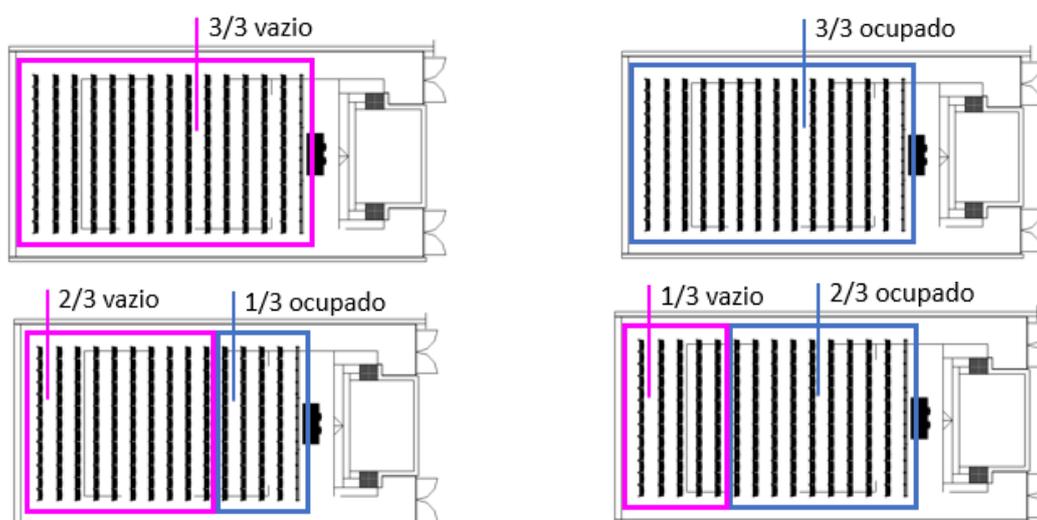


Figura 3.8 - Esquema gráfico da ocupação considerada na variação do público do Anfiteatro AFD3.1.

Diante dos coeficientes de absorção para as cadeiras de acordo com a variação da ocupação, foi realizada a simulação numérica para os diferentes tipos de composição da plateia, ou seja, 1/3 e 2/3 de ocupação e a lotação total. Assim, conforme mostra o Quadro 3.8, foi calculado o tempo de reverberação de acordo com a ocupação da sala.

Quadro 3.8 - Tempos de reverberação com variação de ocupação em modelo numérico calibrado do anfiteatro.

Variação da ocupação	Tempo de Reverberação						Tr médio (500,1000,2000Hz) (s)
	125	250	500	1000	2000	4000	
Cadeiras sem ocupação (Vazias)	1,36	1,71	2,02	1,96	1,78	1,36	1,92
1/3 da Ocupação + 2/3 Plateia Vazia	1,24	1,41	1,54	1,45	1,35	1,08	1,45
2/3 da Ocupação + 1/3 Plateia Vazia	1,17	1,21	1,23	1,19	1,05	0,90	1,16
3/3 da Ocupação (Lotação Total)	1,09	1,01	1,05	0,99	0,96	0,80	1,00

Diante do quadro acima, percebe-se que a ocupação total da sala adiciona uma absorção sonora ao ambiente, reduzindo 0,92s do tempo de reverberação médio em relação ao anfiteatro vazio. Observa-se que o anfiteatro não cumpre o requisito do RRAE de tempo de reverberação tanto para a salas vazias de 1,12s, assim como o valor de referência (Stephens and Bate, 1950) para salas ocupadas de 0,78s mesmo com a adição de absorção sonora produzida pelo público.

3.4 Reabilitação com Conceito de Acústica Variável - Anfiteatro AFD 3.1

Posteriormente a calibração do modelo numérico e a avaliação da variação da ocupação do anfiteatro, pôde-se prosseguir com o objetivo de propor uma solução de reabilitação com painel com o conceito de acústica variável para o anfiteatro. Numa primeira fase foi desenvolvida uma solução fixa e, posteriormente, a solução variável com a intenção de determinar a eficácia acústica de uma solução variável (mais onerosa, mas previsivelmente conducente a uma melhoria na qualidade sonora) face a uma solução fixa (mais econômica, mas com qualidade sonora limitada).

3.4.1 Reabilitação – Solução Inicial Fixa

Após a definição da variação de ocupação da plateia, determinou-se a fixação de alguns parâmetros para a reabilitação do anfiteatro. Determinou-se que a reabilitação será fixada em 1/3 do fundo da sala na parede e no teto (5,3m do fundo do anfiteatro), por ser uma área com dimensões para introduzir absorção sonora e permitir evitar os defeitos acústicos causados por ecos flutuantes e reflexões tardias. Assim, a fim de cumprir com o requisito para sala sem ocupação, foi estabelecido como solução inicial fixa (Figura 3.9), que 1/3 do teto será substituído por placas de 12,5mm de espessura em gesso cartonado perfurado, do tipo Cleaneo Akustik, com véu acústico e lã mineral e caixa de ar de 400mm, com taxa de perfuração de 8,7%, com diâmetro de 6mm e espaçamento de 18mm (0,40; 0,45; 0,45; 0,50; 0,45; 0,50) (Knauf, 2019). Em 1/3 das paredes do fundo e laterais, os materiais serão substituídos por painel de madeira CFRF 3/12-32/16, com 12mm de espessura e ranhura de 3mm, perfuração de 6,55% com 12mm de diâmetro, com tela acústica e lã mineral (0,15; 0,65; 0,90; 0,75; 0,45; 0,50) (Castelhano & Ferreira, 2019).

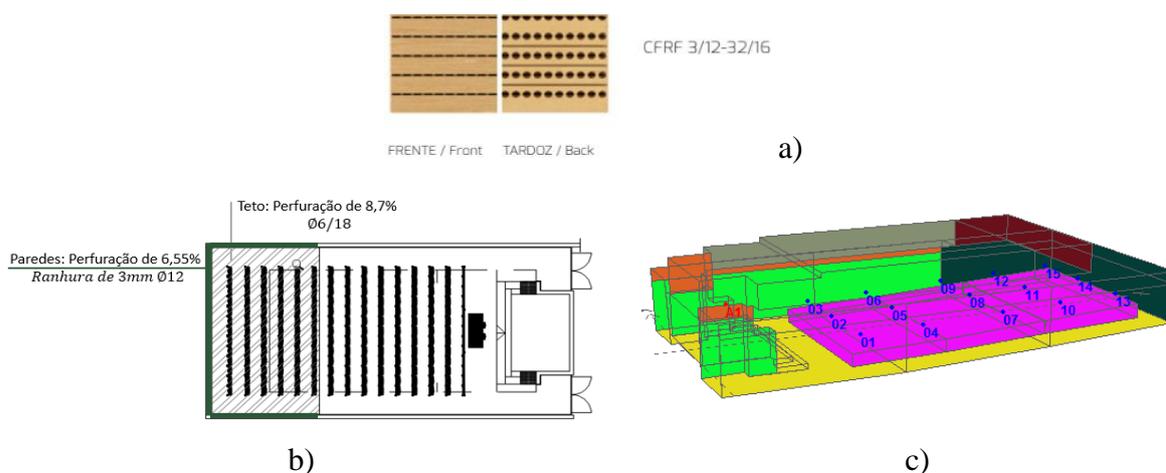


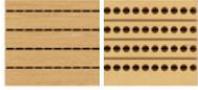
Figura 3.9 - Disposição de materiais em 1/3 do fundo para a solução inicial fixa do anfiteatro.

a) Material escolhido b) Solução em planta baixa c) Solução em 3D gerada no CATT Acoustic.

3.4.2 Resultados Obtidos

Com a definição das novas soluções de revestimento para o teto e paredes, calcularam-se os tempos de reverberação para a sala com essa proposta de reabilitação inicial fixa e para a variação da ocupação da plateia, conforme mostra no Quadro 3.9.

Quadro 3.9 - Tempos de reverberação do anfiteatro com solução fixa e a variação de ocupação.



CFRF 3/12-32/16

Variação da ocupação	Área de ocupação (m ²)	Tempo de Reverberação						Tr médio (500,1000,2000Hz) (s)	Tr Referência para Sala Vazia e Ocupada
		125	250	500	1000	2000	4000		
Cadeiras sem ocupação (Vazias)	97,50	1,09	0,96	1,08	1,05	1,10	0,89	1,08	1,12s
1/3 da Ocupação + 2/3 Plateia Vazia	30,99	0,98	0,80	0,83	0,79	0,83	0,73	0,82	0,78s
2/3 da Ocupação + 1/3 Plateia Vazia	62,19	0,92	0,71	0,76	0,73	0,75	0,64	0,75	
3/3 da Ocupação (Lotação Total)	97,50	0,88	0,71	0,77	0,75	0,74	0,65	0,75	

Observa-se no quadro acima que para essa solução inicial, considerando o valor de referência de $Tr_{médio}$ para sala sem ocupação de 1,12s, o anfiteatro cumpre o requisito pois tem o resultado de 1,08s. Apesar de possuir um resultado 0,04s abaixo do requisito regulamentar (RRAE), por se tratar de um resultado para o anfiteatro vazio, é considerado aceitável este valor de tempo de reverberação médio. Em relação ao anfiteatro com ocupação, nota-se que não cumpre o requisito de 0,78s, assumido como requisito de qualidade para o anfiteatro ocupado, visto que obteve um resultado de $Tr_{médio}$ 0,03s abaixo do requisito para lotação total e 2/3 de público, e, 0,04s acima para 1/3 de ocupação.

3.4.2.1 Nível Sonoro

Após definição da solução de reabilitação inicial fixa, avaliou-se o nível sonoro em relação a posição da fonte 1 e aos 15 receptores posicionados na plateia para o anfiteatro vazio (modelo numérico calibrado) e o modelo numérico com a reabilitação inicial, conforme apresenta a Figura 3.10:

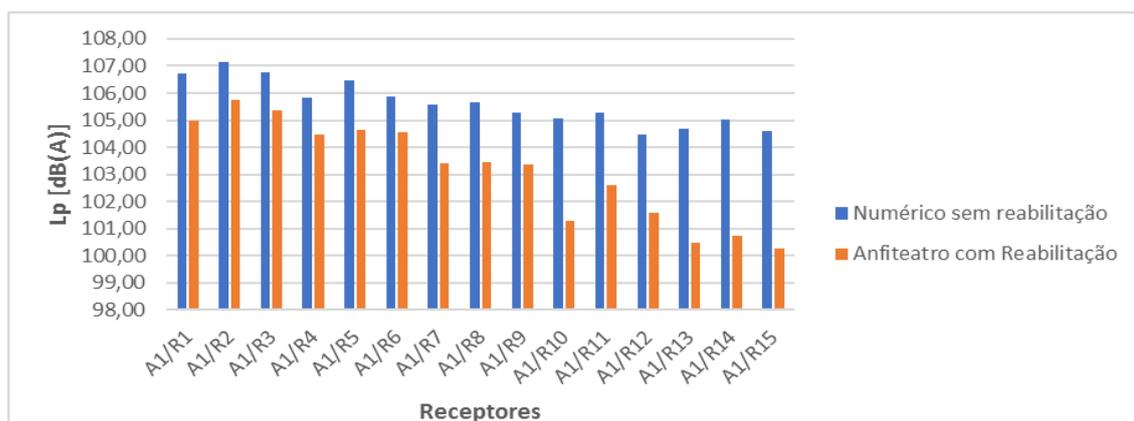


Figura 3.10 - Valores de níveis sonoros obtidos para o anfiteatro com a solução de reabilitação e o modelo numérico sem reabilitação.

Ao analisar a Figura 3.10, conclui-se que os valores para o anfiteatro com reabilitação são menores ao comparado com o modelo numérico do anfiteatro sem reabilitação. Observa-se que as maiores diferenças de resultados entre os dois modelos se encontram entre os receptores 10 a 15, o que pode ser justificado já que estes se encontram ao fundo no anfiteatro próximos onde foi proposta a solução de reabilitação.

Ao comparar as variações de níveis sonoros entre primeiras e últimas filas (R1-R13, R2-R14 e R3-R15), para o anfiteatro sem reabilitação tem-se, respectivamente, 2,02 dB(A), 2,13 dB(A) e 2,16 dB(A), enquanto que para o anfiteatro com reabilitação no fundo da sala tem-se, respectivamente, 4,50 dB(A), 4,99 dB(A), 5,09 dB(A), ou seja, com a solução de reabilitação do anfiteatro obteve-se um decréscimo mais elevado entre receptores.

3.4.2.2 RASTI

Para simulação da reabilitação inicial fixa, calculou-se o índice RASTI em todos os receptores para o anfiteatro vazio com reabilitação e comparou-se com o modelo numérico calibrado sem reabilitação, conforme apresentado na Figura 3.11.

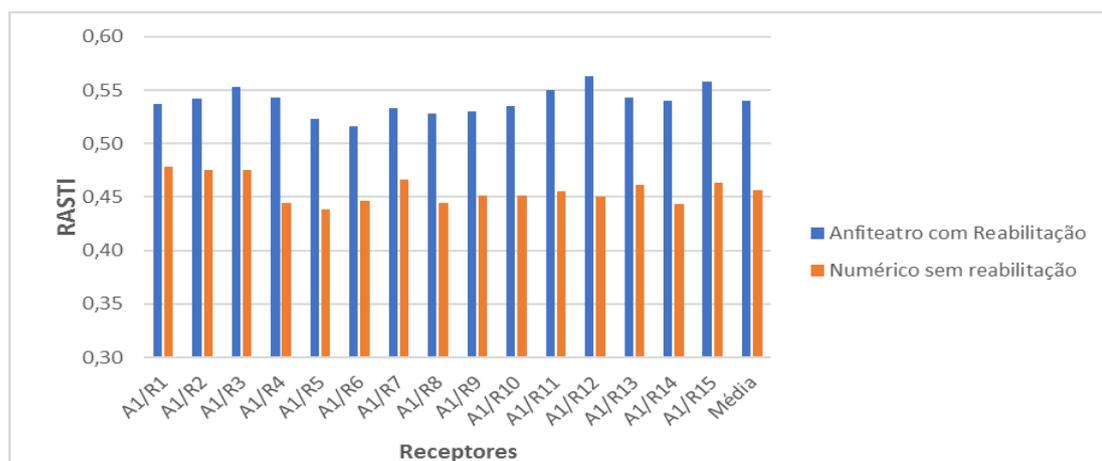


Figura 3.11 - Valores do índice RASTI obtidos para o anfiteatro com e sem reabilitação para a plateia sem ocupação.

Verifica-se ao analisar a Figura 3.11 que, como esperado, os valores para o anfiteatro com reabilitação são melhores em relação ao mesmo sem reabilitação, que era avaliado com uma inteligibilidade pobre tendo um índice de 0,46. Com o aumento dos valores obtidos com a reabilitação, o anfiteatro ganha valores razoáveis na inteligibilidade, pois o valor médio entre os 15 receptores é igual a 0,54, sendo considerado aceitável.

3.4.3 Reabilitação - Solução Variável

Devido ao fato de a reabilitação inicial não cumprir os requisitos regulamentares para o anfiteatro com ocupação, foi proposta uma solução de reabilitação com acústica variável para que os painéis integrados na solução de acústica variável adicionem absorção na sala, visando cumprir os requisitos para cada tipo de variação do público. A partir disso, definiu-se como fixo o novo material do teto com as placas de gesso com perfuração 8,7% (mencionado anteriormente) (Knauf, 2019), e, determinou-se que os painéis de acústica variável, devem ter um coeficiente diferente para cada uma das três faces, e serão colocados em 1/3 da parede, do chão ao teto.

Com isso, foi proposto que uma das faces tenha uma absorção menor para que os tempos de reverberação médio com 2/3 de ocupação e com a sala lotada, se aproximem a 0,78s conforme o requisito regulamentar. Nesta primeira face, foi considerado que o painel estará disposto na parede de forma que as faces estejam lado a lado, sendo a visualização do público em relação ao painel seja de um revestimento único e contínuo. Diante disso, conforme Figura 3.12, os painéis das paredes laterais e do fundo, são de madeira CFRF 3/10-32/32, com 12mm de espessura e ranhura de 3mm, e no tardo com perfuração de 2,84% e diâmetro de 10mm, com tela acústica e lã mineral (0,20; 0,85; 0,90; 0,40; 0,25; 0,35) (Castelhano & Ferreira, 2019).

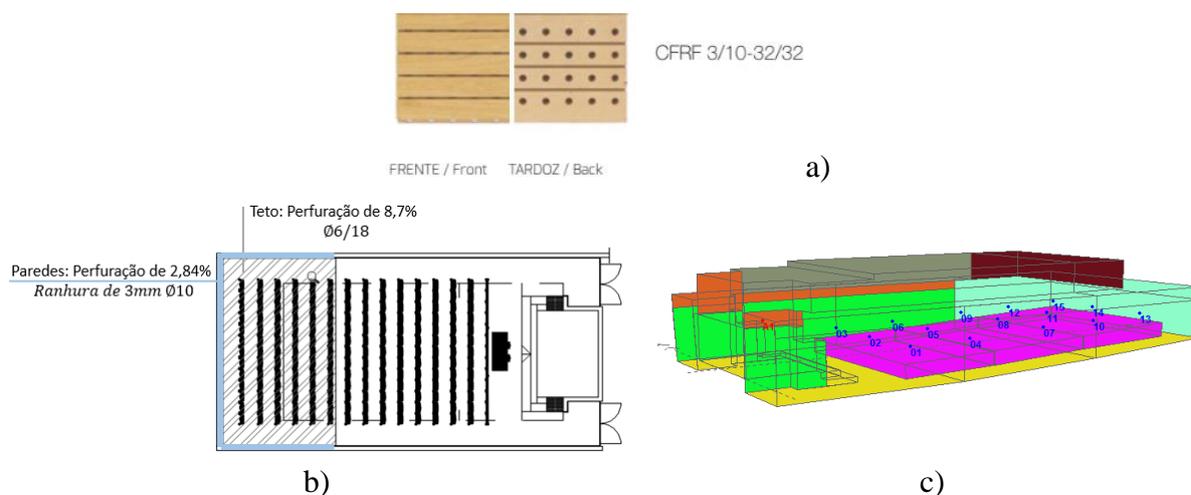


Figura 3.12 - Disposição de materiais em 1/3 do fundo do anfiteatro para a solução com acústica variável para cumprir 2/3 de ocupação e sala lotada. a) Material escolhido b) Solução em planta baixa c) Solução em 3D gerada no CATT Acoustic.

Nesta solução, para efeitos de modelagem no software, não foi considerada o volume que o painel ocupa ao ser implementado na sala, além disso, foi considerado que o número de cadeiras na plateia permaneceria os 182 lugares existentes.

Definida uma das faces do painel, calculou-se os tempos de reverberação com a variação da ocupação para essa solução, conforme Quadro 3.10.

Quadro 3.10 - Tempo de reverberação para o anfiteatro com primeira solução para compor painel de acústica variável, com variação da ocupação.

Variação da ocupação	Tempo de Reverberação						Tr médio (500,1000,2000Hz) (s)	Tr Referência para Sala Vazia e Ocupada
	125	250	500	1000	2000	4000		
Cadeiras sem ocupação (Vazias)	1,04	0,95	1,06	1,11	1,13	0,93	1,10	1,12
1/3 da Ocupação + 2/3 Plateia Vazia	0,95	0,75	0,82	0,88	0,89	0,75	0,86	0,78
2/3 da Ocupação + 1/3 Plateia Vazia	0,89	0,72	0,75	0,78	0,78	0,68	0,77	
3/3 da Ocupação (Lotação Total)	0,84	0,69	0,75	0,77	0,79	0,67	0,77	

Conforme mostra no quadro acima, percebe-se que esse painel de madeira ranhurado cumpre o requisito de 0,78s para sala ocupada, obtendo resultado de 0,77s para 2/3 de ocupação e sala

lotada. Além disso, percebe-se que ele promove um tempo de reverberação médio menor para a sala vazia, porém ainda sim, cumpre com o requisito regulamentar de 1,12s, sendo também uma opção de solução a ser utilizada.

Visto que o material apresentado acima, não cumpre o requisito para 1/3 de ocupação, foi determinado outro revestimento com uma absorção maior para compor a terceira face do painel. Neste caso, o material escolhido para a terceira face foi o painel de madeira CFRR, com 12mm de espessura e ranhura de 3mm, perfuração de 12,50% com 80x8mm, com tela acústica e lã mineral (0,15; 0,55; 0,90; 0,90; 0,75; 0,75) (Castelhana & Ferreira, 2019). Na Figura 3.13 mostra a disposição do material no anfiteatro em planta e em modelo tridimensional.

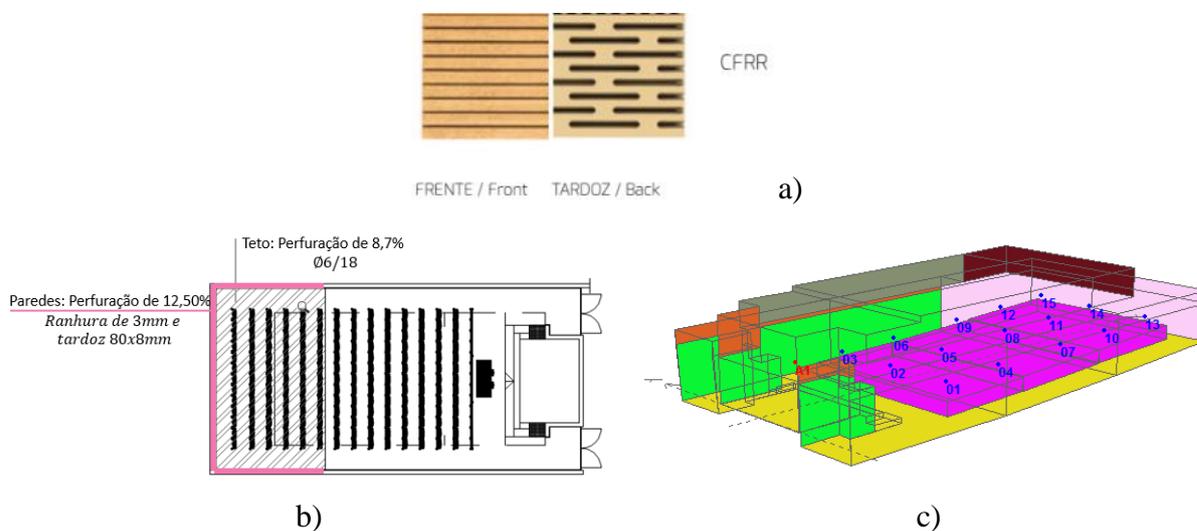
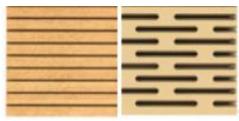


Figura 3.13 - Disposição de materiais em 1/3 do fundo do anfiteatro para a solução com acústica variável para cumprir 1/3 de ocupação. a) Material escolhido a) Solução em planta baixa b) Solução em 3D gerada no CATT Acoustic.

Definido outra face do painel, calculou-se os tempos de reverberação com a variação da ocupação para essa solução, conforme Quadro 3.11.

Quadro 3.11 - Tempo de reverberação para o anfiteatro com segunda solução para compor painel de acústica variável, com variação da ocupação.

 CFRR	Tempo de Reverberação						Tr médio (500,1000,2000Hz) (s)	Tr Referência para Sala Vazia e Ocupada
	Variação da ocupação	125	250	500	1000	2000		
Cadeiras sem ocupação (Vazias)	1,05	0,99	1,07	1,03	1,02	0,88	1,04	1,12s
1/3 da Ocupação + 2/3 Plateia Vazia	0,97	0,80	0,83	0,78	0,80	0,70	0,80	0,78s
2/3 da Ocupação + 1/3 Plateia Vazia	0,92	0,71	0,75	0,73	0,72	0,65	0,73	
3/3 da Ocupação (Lotação Total)	0,88	0,72	0,75	0,70	0,75	0,62	0,73	

Diante dos dados acima, observa-se que para 1/3 de ocupação, o revestimento escolhido cumpre o requisito de $Tr_{médio}$ de 0,78s, por obter um resultado numa margem aceitável de 0,80s. Com a terceira face estabelecida, define-se a composição das três faces do painel tridimensional com acústica variável, para as quatro possibilidades de variação de ocupação.

3.4.4 Resultado Obtidos

Após definição dos materiais escolhidos para o painel de acústica variável, pode-se esquematizar a composição das três faces da solução, conforme mostra a Figura 3.14. Diante disso, ficou determinado que uma face será a Solução Fixa com material em painel de madeira CFRF 3/12-32/16, com 12mm de espessura e ranhura de 3mm, perfuração de 6,55% com 12mm de diâmetro, com tela acústica e lã mineral; a segunda face será a Solução 1 com material em painel de madeira CFRF 3/10-32/32, com 12mm de espessura e ranhura de 3mm, perfuração de 2,84% com 10mm de diâmetro, com tela acústica e lã mineral; e a terceira face será a Solução 2 com material em painel de madeira CFRR, com 12mm de espessura e ranhura de 3mm, perfuração de 12,50% com 80x8mm, com tela acústica e lã mineral (Castelhano & Ferreira, 2019). É importante ressaltar que os resultados obtidos no software não consideram o formato da caixa de ar que possui grande influência sobre o painel.

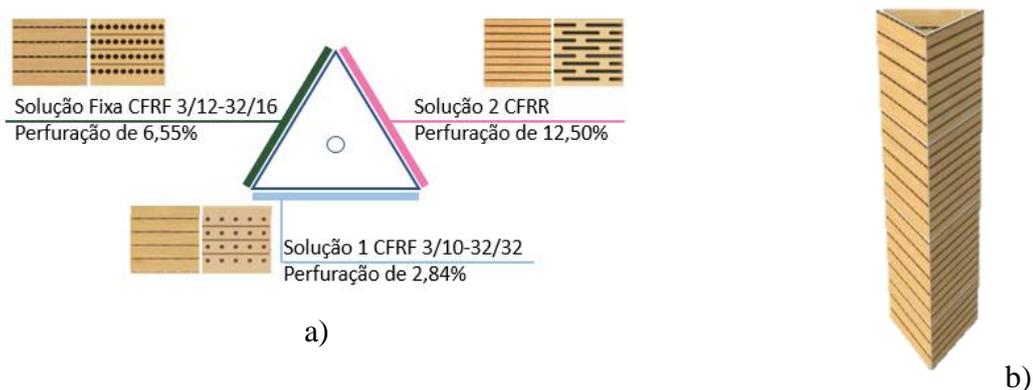


Figura 3.14 - Representação esquemática das faces do painel tridimensional com acústica variável para o anfiteatro. a) Em planta b) Em 3D.

Diante das soluções definidas, na Figura 3.15, está representada a imagem renderizada em 3D das Soluções (Solução Fixa e 1) que possuem painéis com estética similar, enquanto que na Figura 3.16, está representada a Solução 2 ao ser instalados no Anfiteatro AFD3.1.



Figura 3.15 – Imagem renderizada da Solução Fixa e Solução 1 ao ser instalada no Anfiteatro AFD3.1. a) Painel com solução instalada na sala b) Imagem ampliada da solução.

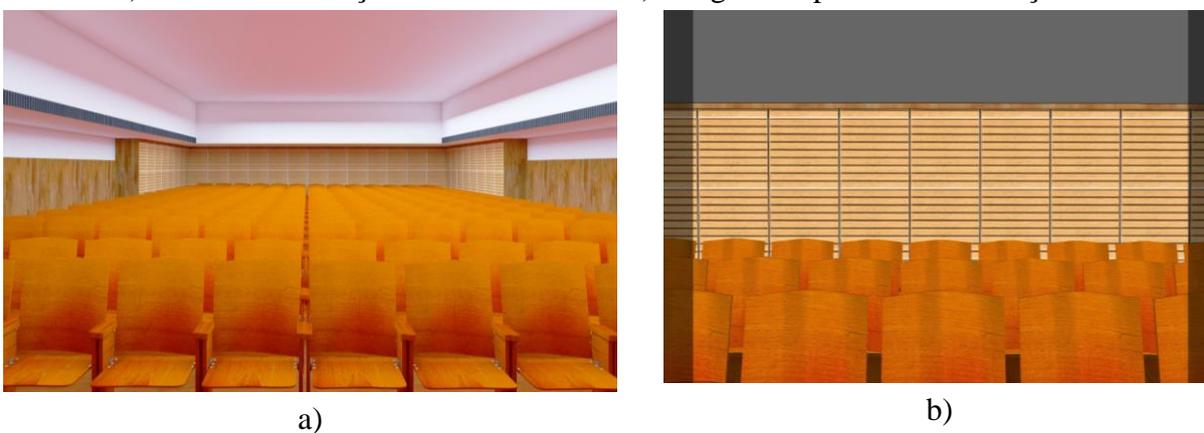


Figura 3.16 - Imagem renderizada da Solução 2 ao ser instalada no Anfiteatro AFD3.1. a) Painel com solução instalada na sala b) Imagem ampliada da solução.

3.4.4.1 Nível Sonoro

Após definição das soluções de reabilitação com acústica variável, avaliou-se o nível sonoro em relação a posição da fonte 1 e aos 15 receptores posicionados na plateia para os diversos tipos de ocupação do anfiteatro. Diante disso, conforme apresentados na Figura 3.17, pode-se analisar os resultados de níveis sonoros obtidos com a reabilitação do anfiteatro com a solução de acústica variável e a variação da ocupação.

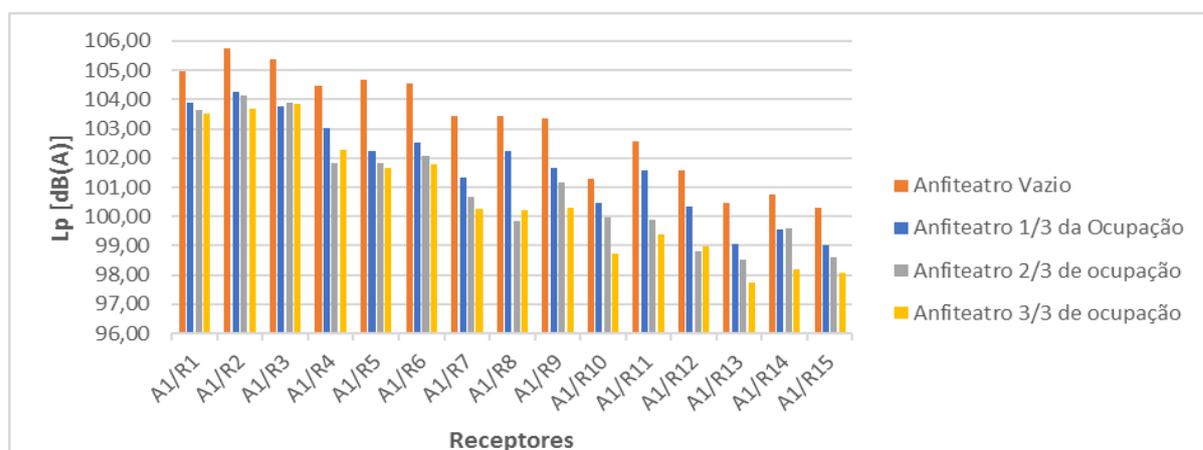


Figura 3.17 - Valores de nível sonoro obtidos para o anfiteatro reabilitado e com as variações de ocupação para a solução de acústica variável.

Ao analisar os resultados obtidos na Figura 3.17, conclui-se que as variações dos valores de nível sonoro entre as primeiras e últimas fileiras (R1-R13, R2-R14 e R3-R15) são: para o anfiteatro com 1/3 de ocupação respectivamente, 4,85 dB(A), 4,71 dB(A) e 4,74 dB(A); para o anfiteatro com 2/3 de ocupação respectivamente, 5,11 dB(A), 4,56 dB(A) e 5,28 dB(A); e para o anfiteatro com ocupação total respectivamente, 5,80 dB(A), 5,49 dB(A) e 5,80 dB(A), ou seja, a variação entre primeiras e últimas fileiras têm, maioritariamente, um decréscimo de nível sonoro menor para 1/3 de ocupação e maior para a ocupação total.

3.4.4.2 RASTI

Para o índice RASTI, analisou-se a inteligibilidade da palavra para as soluções de reabilitação com a solução de acústica variável em relação a variação da ocupação do público para os 15 receptores, conforme apresentado na Figura 3.18.

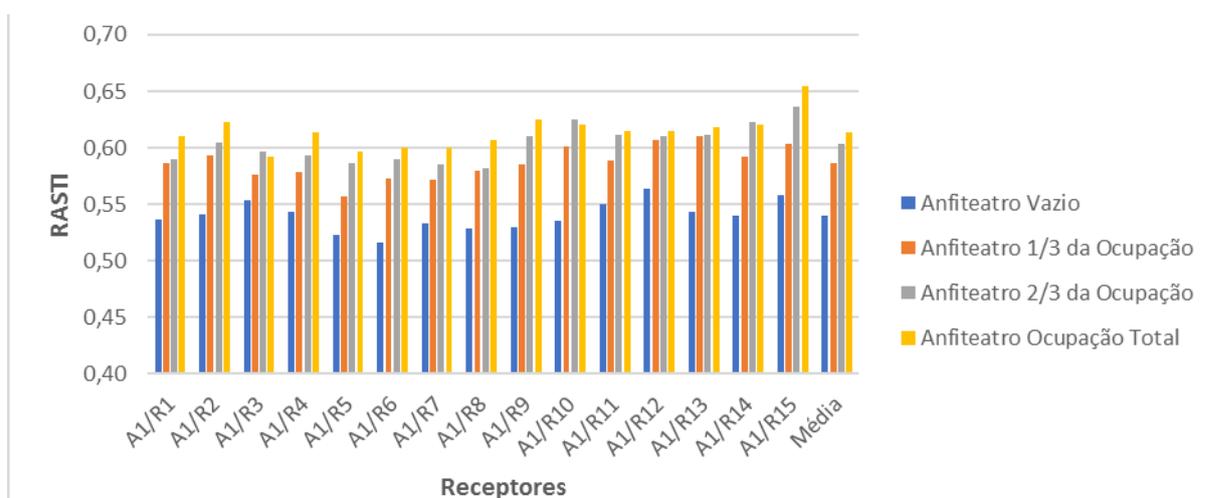


Figura 3.18 - Valores do índice RASTI obtidos para o anfiteatro reabilitado e com as variações de ocupação para a solução de acústica variável.

Verifica-se ao analisar a Figura 3.18 que os valores mais elevados do índice RASTI ocorrem quando há a ocupação total do anfiteatro, enquanto que os menores índices ocorrem quando o anfiteatro está vazio. Observa-se que para todas as ocupações, além da primeira fileira, os maiores valores se encontram nas últimas fileiras próximos aos locais onde ocorreram reabilitação. Com as soluções adotadas, os resultados médios do índice RASTI encontrados para cada tipo de ocupação são: para 1/3 de ocupação, o valor é igual a 0,59, para 2/3 de ocupação o valor é igual a 0,60 e, para ocupação total, o valor é igual a 0,61. De acordo com Isbert (1998), estes valores do índice RASTI são consideráveis como aceitável a inteligibilidade da palavra no anfiteatro.

3.4.5 Comparação de Resultados da Reabilitação

Diante dos dados de reabilitação propostas, comparou-se os valores obtidos para a solução fixa e para as soluções com a conceito de acústica variável quanto aos parâmetros de qualidade sonora, sendo eles o nível sonoro, o tempo de reverberação médio e o índice de inteligibilidade da palavra RASTI.

3.4.5.1 Nível Sonoro

Quanto ao nível sonoro, primeiramente, comparou-se os valores obtidos para 1/3 de ocupação do anfiteatro entre a solução fixa e a solução utilizada para a acústica variável (Figura 3.19), e posteriormente, comparou-se o mesmo para 2/3 de ocupação (Figura 3.20).

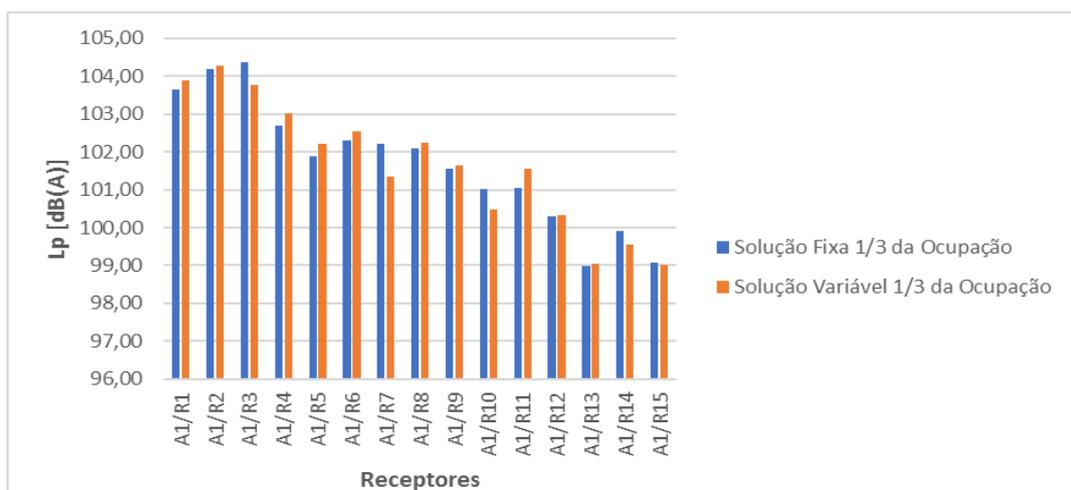


Figura 3.19 - Valores de níveis sonoros obtidos para solução fixa e variável para 1/3 de ocupação do anfiteatro.

Ao analisar os resultados obtidos na Figura 3.19, para o anfiteatro com 1/3 de ocupação, observa-se que as diferenças dos valores de nível sonoro entre as primeiras e últimas fileiras (R1-R13, R2-R14 e R3-R15) para a solução inicial fixa proposta são: 4,68 dB(A), 4,28 dB(A) e 5,31 dB(A) e, para a solução com o conceito de acústica variável são: 4,85 dB(A), 4,71 dB(A) e 4,74 dB(A). Com isso, percebe-se que a solução inicial fixa possui diferenças de níveis sonoros inferiores em relação a solução variável, com exceção dos receptores R3-R15. Verifica-se ainda que a solução variável possui valores de níveis sonoros ligeiramente superiores em relação a solução fixa na maioria dos receptores.

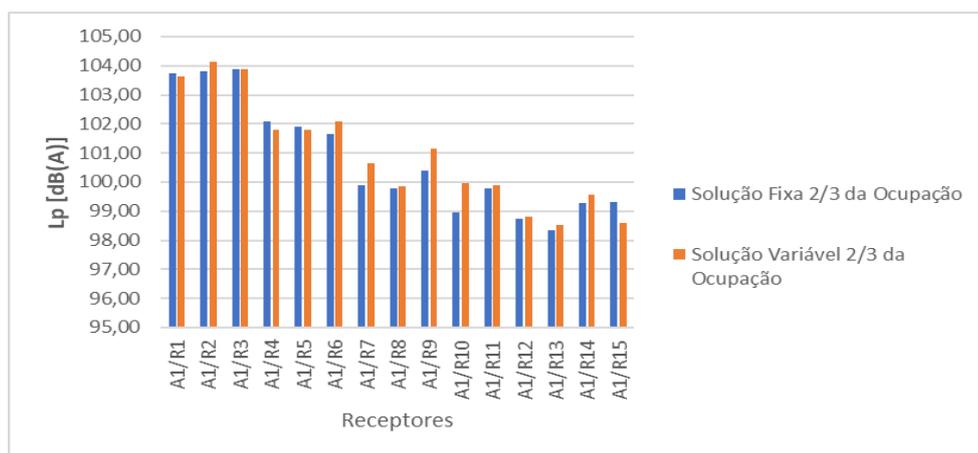


Figura 3.20 - Valores de níveis sonoros obtidos para solução fixa e variável para 2/3 de ocupação do anfiteatro

Em relação aos resultados obtidos para ocupação de 2/3 da plateia do anfiteatro (Figura 3.20), observa-se que as diferenças dos valores de nível sonoro entre as primeiras e últimas fileiras (R1-R13, R2-R14 e R3-R15) para a solução inicial fixa proposta são: 5,38 dB(A), 4,54 dB(A)

e 4,54 dB(A) e, para a solução com o conceito de acústica variável são: 5,11 dB(A), 4,56 dB(A) e 5,28 dB(A). Logo, a solução variável possui diferenças de níveis sonoros superiores em relação a solução fixa, com exceção dos receptores R1-R13.

Nota-se ao comparar as Figura 3.19 e Figura 3.20 que ao aumentar a ocupação da sala, de 1/3 da plateia para 2/3 da plateia, houve um decréscimo de nível sonoro nas fileiras intermediárias. Isso ocorre devido ao acréscimo de absorção sonora proporcionada pelas pessoas sentadas na plateia que ocorreu de forma regular (cadeiras da frente e do meio), como proposto anteriormente.

3.4.5.2 Tempo de Reverberação e RASTI

Relativamente ao parâmetro de tempo de reverberação e índice RASTI, comparou-se os valores obtidos relacionando os dois parâmetros de qualidade sonora para todos os tipos de ocupação do anfiteatro, para a solução inicial fixa e a solução com o conceito de acústica variável, conforme Quadro 3.12.

Quadro 3.12 - Valores de Tempo de reverberação médio e RASTI obtidos para a solução fixa e variável com todos os tipos de ocupação do anfiteatro.

<i>Tempo de Reverberação Médio</i>				
	Anfiteatro Vazio	Plateia com 1/3 da Ocupação	Plateia com 2/3 da Ocupação	Plateia com 3/3 da Ocupação
<i>Solução Fixa</i>	1,08s	0,82s	0,75s	0,75s
<i>Solução Variável</i>	1,08s	0,80s	0,77s	0,77s
<i>RASTI</i>				
	Anfiteatro Vazio	Plateia com 1/3 da Ocupação	Plateia com 2/3 da Ocupação	Plateia com 3/3 da Ocupação
<i>Solução Fixa</i>	0,54	0,59	0,61	0,62
<i>Solução Variável</i>	0,54	0,59	0,60	0,61

Ao analisar o quadro acima, observa-se que para o tempo de reverberação médio, a solução fixa possui valores inferiores à solução variável para todos os tipos de ocupação, com exceção da configuração de 1/3 da ocupação. Além disso, verifica-se que a solução fixa não cumpre o valor de referência utilizado para salas ocupadas com função de oratória (Stephens and Bate, 1950), ou seja, não é uma solução eficaz para todos os tipos de ocupação do anfiteatro.

Já em relação ao índice RASTI, a solução fixa possui valores semelhantes para o anfiteatro vazio e para 1/3 de ocupação, e valores mínimos superiores à solução variável para 2/3 e 3/3 de ocupação. Nota-se ao comparar os resultados obtidos com a solução fixa e a solução variável que, apesar de cumprir os requisitos regulamentares do RRAE (2008), a ligeira

melhoria proporcionada pela solução variável não é eficaz a ponto de obter ganhos acústicos relevantes ao anfiteatro. Sendo assim, conclui-se, neste caso, que a solução com o conceito de acústica variável não permite acrescentar uma melhor qualidade sonora significativa ao anfiteatro, logo, não compensa o custo-benefício da solução, por precisar de um maior investimento na implementação, e proporcionar um ajuste mínimo no tempo de reverberação.

4 ESTUDO DE CASO 2: AUDITÓRIO LAGINHA SERAFIM

Propõe-se neste capítulo a avaliação de uma solução, tendo como base o conceito de acústica variável, a ser implantada no segundo estudo de caso hipotético, o Auditório Laginha Serafim, existente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Diante disso, serão realizadas as mesmas etapas feitas para o primeiro estudo de caso, porém propondo que a solução, tendo como base o conceito de acústica variável, a ser implantada no auditório, permita manter a qualidade sonora da sala quando ocorrem diferentes tipos de utilização, ou seja, quando utilizado para concertos, câmara, ópera e oratória. Por fim, será feito uma avaliação do desempenho acústico através da análise dos parâmetros mencionados.

4.1 Caracterização do Objeto de Estudo

4.1.1 Descrição do Auditório

O Auditório Laginha Serafim localiza-se no Pólo II da Universidade de Coimbra, no edifício do Departamento de Engenharia Civil, onde o acesso é realizado pelo terceiro piso do edifício. O auditório possui um volume de 1084 m³ e se dispõe em dois pavimentos, o primeiro pavimento do auditório referente ao palco e plateia sentada, e o segundo pavimento referente a plateia em pé, disposta através de um balcão que circunda as laterais e fundo do auditório, permitindo a visualização do palco (Ver planta em Anexo V).

Este auditório é utilizado para atividades de oratória como conferências, colóquios, palestras, reuniões e possui as seguintes características dimensionais (Quadro 4.1):

Quadro 4.1 - Características dimensionais do Auditório Laginha Serafim

Características	Valor
Nº de lugares – Plateia Sentada	230 lugares
Volume (m ³)	1084 metros cúbicos
Largura Máxima (m)	13,30 metros
Comprimento Máximo (m)	16,50 metros
Pé direito Máximo (m)	6,5 metros

Em relação às características arquitetônicas e condicionantes acústicas do auditório, encontra-se uma plateia sentada com 230 cadeiras estofadas, um palco, duas portas de madeira em cada pavimento, paredes revestidas com painéis de contraplacado e em alvenaria de tijolo, teto em gesso acartonado e pisos rígidos em parquet (Figura 4.1).



Figura 4.1 - Vista Interna do Auditório Laginha Serafim

4.1.2 Descrição das Condicionantes Acústicas

As especificações dos revestimentos e seus respectivos coeficientes de absorção sonora para cada frequência que são considerados e inseridos na modelagem do auditório em software CATT Acoustic, estão apresentadas no Quadro 4.2. Os coeficientes de absorção das cadeiras da plateia foram obtidos a partir dos valores da calibração encontrados em pesquisa de referência (Paulino, 2008), que por sua vez, utilizou como dados iniciais os coeficientes de absorção para cadeiras estofadas (0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,50) (Patrício, 2004), para as bandas de frequência de 125Hz a 4000Hz.

Quadro 4.2 - Área e coeficientes de absorção sonora dos materiais existentes no Auditório Laginha Serafim.

Materiais de Revestimento	Referência	Área Total (m ²)	Coeficiente de absorção sonora (α)					
			Frequência (Hz)					
			125	250	500	1000	2000	4000
Material do Teto								
Teto em gesso cartonado com grande caixa-de-ar	(Paulino, 2008)	263,77	0,16	0,13	0,09	0,07	0,05	0,04
Material do Pavimento								
Revestimento de piso tipo "parquet", dispostos em pavimento rígido	(Patrício, 2004 apud Paulino, 2008)	264,85	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
Materiais das Paredes								
Parede em Betão (ou alvenaria de tijolo rebocado e estucado)	(Patrício, 2004)	236,84	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05
Revestimento em painéis de contraplacado com 13mm de espessura, com camada de a de 2,5cm de espessura	(Paulino, 2008)	271,16	0,12	0,10	0,08	0,08	0,05	0,05
Material das Portas								
Portas de Madeira	(Patrício, 2004)	21,40	0,12	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
Materiais do Mobiliário								
Cadeiras estofadas	(Paulino, 2008)	151,63	0,10	0,14	0,18	0,17	0,32	0,31

Verifica-se ao analisar as áreas e coeficientes de absorção apresentados que, o gesso cartonado e o revestimento em contraplacado possuem maiores áreas de influência nas baixas e médias frequências. Além disso, observa-se que as cadeiras estofadas exercem grande influência nas médias e, principalmente, nas altas frequências, tendo uma grande importância na absorção sonora do auditório.

4.1.3 Descrição do Modelo

O software utilizado na modelagem e avaliação acústica foi o utilizado no primeiro estudo de caso, ou seja, o software CATT Acoustic. Os resultados foram obtidos considerando a potência da fonte sonora com 105dB, e os receptores foram localizados na plateia a 0,5m do plano do piso, tendo a plateia dividida em 5 paralelepípedo para ser inserida no programa. Com isso, para a calibração foram considerados os valores obtidos pela Fonte 1 (A1), localizada atrás da mesa no centro do palco, e foram posicionados 15 receptores na plateia, sendo divididos em 3 receptores a cada linha dispostos paralelamente ao palco, conforme disposto na Figura 4.2

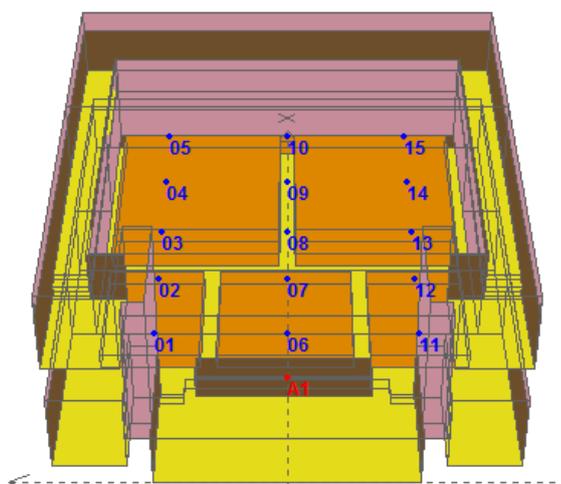


Figura 4.2 - Modelo do Auditório Laginha Serafim com posicionamento de Fonte A1 e Receptores do 1 ao 15 na plateia, desenvolvido no CATT Acoustic.

Na modelagem do auditório foi considerado que todos os materiais tem 10% de difusão para cada a banda de frequência (0,10; 0,10; 0,10; 0,10; 0,10; 0,10), com exceção das cadeiras estofadas, que foram considerados os coeficientes de difusão (0,30; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70; 0,70). Com isso, prosseguiu-se a calibração do modelo para que o mesmo obtenha resultados mais próximos do real.

4.1.4 Resultados

Após a obtenção dos dados de coeficientes de absorção sonora dos revestimentos existentes do Auditório Laginha Serafim, simulou-se o modelo no software CATT Acoustic, obtendo resultados de tempos de reverberação para cada banda de frequência e o tempo de reverberação médio ($Tr_{\text{médio}}$). Desta forma, comparou-se os resultados numéricos obtidos com o modelo, os resultados experimentais medidos in situ (Paulino, 2008), e com o modelo analítico obtido através da fórmula de Sabine, sendo estes dispostos no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Valores de Tempo de Reverberação médio e para cada banda de frequência, obtidos para o Auditório Laginha Serafim.

Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	$Tr_{500,1000,2000}$ (s)
Tr (s) - Experimental (F1)	2,65	2,32	2,38	2,45	2,01	1,29	2,28
Tr (s) - Numérico s/ calibração (F1)	2,17	2,19	2,26	2,30	1,90	1,52	2,15
Tr (s) Sabine	1,50	1,49	1,51	1,55	1,18	1,03	1,41

Ao analisar o Quadro 4.3, observa-se que o modelo numérico em relação ao método experimental possui $Tr_{\text{médio}}$ com diferença de 0,13s, enquanto que em relação ao método

analítico de Sabine possui $Tr_{\text{médio}}$ com diferença de 0,74s. Percebe-se ainda que, os tempos de reverberação apresentado pela fórmula de Sabine possuem resultados inferiores em relação aos calculados numericamente devido as limitações de coeficientes de absorção ($\alpha_{\text{médio}} \leq 0,10$ s) que são superiores principalmente para as cadeiras pouco estofadas e em algumas frequências para alguns revestimentos.

Com os resultados apresentados acima, pode-se observar na Figura 4.3, os diferentes tempos de reverberação para cada frequência obtidos de forma experimental, numérico e analítico.

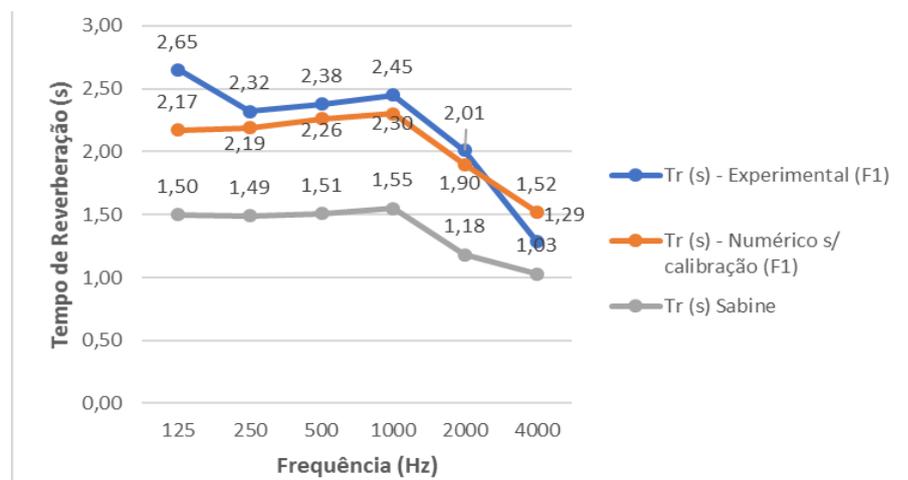


Figura 4.3 - Gráfico com tempos de reverberação dos resultados experimentais, numérico e analítico para o auditório.

Verifica-se no diagrama da Figura 4.3 que os resultados dos três modelos (experimental, numérico e analítico) possuem um comportamento semelhante, apresentando valores decrescentes até os 250Hz, depois um crescimento até os 1000Hz, e posteriormente, valores decrescentes até os 4000Hz. Ainda é possível observar que, o comportamento gráfico do modelo numérico e o analítico de Sabine são semelhantes, apesar de possuírem uma diferença de tempos de reverberação elevada. Percebe-se ainda que existem semelhanças no comportamento gráfico e proximidade de valores entre o modelo numérico e o experimental nas frequências de 250Hz a 2000Hz, enquanto que na frequência de 125Hz e 4000z, o modelo experimental possui valores, respectivamente, superior e inferior ao modelo numérico.

Com os tempos de reverberação encontrados, observa-se que o Auditório Laginha Serafim, através do método experimental, possui o $TR_{\text{médio}}$ de 2,28s, sendo considerado um valor elevado para salas com função de oratória e percepção da palavra, e para cumprir o requisito do RRAE para auditórios. Conforme o artigo 10ºA do RRAE, para auditório vazio, o $TR_{\text{médio}}$ (500Hz – 2kHz) deve cumprir fórmula $T \leq 0,32 + 0,17 \log V$, sendo o valor máximo de 0,84s, considerando o volume interior do auditório igual a 1084m³. Acredita-se que este valor seja inviável de se atingir, pois necessitaria uma grande reabilitação no auditório, porém é

necessário reduzir o tempo de reverberação médio do auditório já que é um ambiente muito reverberante. Desta forma, o auditório não cumpre o requisito máximo apresentado, sendo necessária uma reabilitação de forma a adicionar materiais absorventes na sala para reduzir o tempo de reverberação, e melhorar a inteligibilidade do ambiente. Neste caso, se faz necessário a calibração do modelo para que o mesmo tenha configurações próximas à situação real do Auditório Laginha Serafim.

4.2 Modelagem Numérica e Calibração

4.2.1 Calibração do Modelo

Para realizar a calibração do modelo para que o mesmo se aproxime da situação real do auditório, primeiramente, identificaram-se as diferenças (ΔTr), em segundos, entre os tempos de reverberação do modelo experimental e numérico para cada frequência entre 125Hz e 4000Hz, conforme Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Diferenças entre tempos de reverberação experimental e numérico antes da calibração para o auditório.

Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Tr (s) - Experimental	2,65	2,32	2,38	2,45	2,01	1,29
Tr (s) - Numérico s/ calibração	2,17	2,19	2,26	2,30	1,90	1,52
ΔTr (s)	0,48	0,13	0,12	0,15	0,11	-0,23

Conforme mostra no quadro acima, a maior diferença entre tempos de reverberação do modelo experimental e numérico se encontra na frequência de 125Hz, com um ΔTr de 0,48s, e a menor diferença se encontra na frequência de 2000Hz, com um ΔTr de 0,11s. Diante das diferenças de tempo de reverberação entre os modelos, pode-se realizar a calibração através do ajuste dos coeficientes de absorção sonora de acordo com a influência que cada material exerce em cada frequência.

Analisando a interferência de cada material através da área de absorção equivalente em cada frequência, percebeu-se que os materiais com maiores influências nas baixas e médias frequências são o teto em gesso cartonado e o painel em contraplacado. Já nas médias e altas frequências, a cadeira estofada possui maior influência já que o estofamento apresenta material fibroso que é mais eficaz nestas frequências. Com isso, procedeu-se a calibração através da alteração dos coeficientes de absorção sonora, conforme mostra o Quadro 4.5, que mostra os valores iniciais e finais utilizados no modelo numérico, ou seja, sem calibração e com calibração.

Quadro 4.5 - Coeficientes de absorção sonora iniciais e finais adotados para a calibração do modelo do auditório.

Materiais de Revestimento	Referência	Coeficiente de absorção sonora (α)					
		Frequência (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Material do Teto							
Teto em gesso cartonado com grande caixa-de-ar	(Paulino, 2008)	0,16	0,13	0,09	0,07	0,05	0,04
Coeficientes de absorção finais:		0,12	0,11	0,08	0,06	0,05	0,04
Material do Pavimento							
Revestimento de piso tipo "parquet", dispostos em pavimento rígido	(Patrício, 2004 apud Paulino, 2008)	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
Coeficientes de absorção finais:		0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
Materiais das Paredes							
Parede em Betão (ou alvenaria de tijolo rebocado e estucado)	(Patrício, 2004 apud Paulino, 2008)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05
Coeficientes de absorção finais:		0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05
Revestimento em painéis de contraplacado com 13mm de espessura, com camada de ar de 2,5cm de espessura	(Paulino, 2008)	0,12	0,10	0,08	0,08	0,05	0,05
Coeficientes de absorção finais:		0,10	0,09	0,08	0,08	0,05	0,05
Material das Portas							
Portas de Madeira	(Patrício, 2004 apud Paulino, 2008)	0,12	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
Coeficientes de absorção finais:		0,12	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
Materiais do Mobiliário							
Cadeiras estofadas	(Paulino, 2008)	0,10	0,14	0,18	0,17	0,32	0,31
Coeficientes de absorção finais:		0,10	0,14	0,17	0,16	0,30	0,33

Após a introdução dos novos valores de coeficientes de absorção sonora no software CATT Acoustic, calculou-se o tempo de reverberação obtendo novos resultados para o modelo numérico calibrado. Sendo assim, o $TR_{\text{médio}}$ do modelo numérico calibrado resultou em 2,24s, ou seja, obteve uma diferença de 0,04s do valor resultante do modelo experimental. No Quadro 4.6, observam-se as diferenças entre tempos de reverberação médio experimental e numérico sem e com calibração e em todas as frequências.

Quadro 4.6 - Tempos de reverberação experimental e numérico sem e com calibração do auditório.

Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	Tr 500,1000,2000 (s)
Tr (s) - Experimental	2,65	2,32	2,38	2,45	2,01	1,29	2,28
Tr (s) - Numérico s/ calibração	2,17	2,19	2,26	2,30	1,90	1,52	2,15
Tr (s) - Numérico c/ calibração	2,38	2,30	2,36	2,40	1,97	1,47	2,24
Δ Tr (s)	0,27	0,02	0,02	0,05	0,04	-0,18	0,04

Como pode-se observar no quadro acima que após ajustes dos valores dos coeficientes de absorção sonora dos materiais, tem-se tempos de reverberação mais próximos dos valores do modelo experimental, sendo a diferença máxima de 0,27s na frequência de 125Hz e a diferença mínima de 0,02s nas frequências de 250Hz e 500Hz. Na Figura 4.4, verifica-se as linhas gráficas dos tempos de reverberação antes e depois da calibração em relação ao modelo experimental.

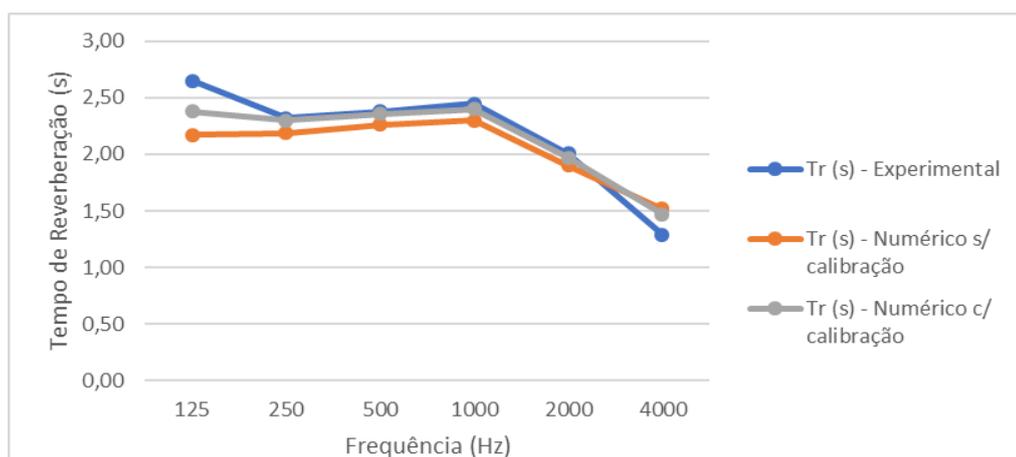


Figura 4.4 - Gráfico com os tempos de reverberação experimental, sem e com calibração do auditório.

Analisando a figura acima, nota-se graficamente que os valores numéricos após calibração se aproximam dos valores experimentais, ou seja, primeiramente, com um valor superior aos 125Hz, depois uma queda aos 500Hz, logo após possui valores ligeiramente crescente até os 1000Hz e valores decrescentes até os 4000Hz. Verifica-se que apesar dos ajustes nos coeficientes de absorção, não há mudanças tão significativas entre as frequências de 250Hz a 2000Hz, ou seja, as alterações mais visíveis se encontram nas frequências de 125Hz e 4000Hz que possuíam grande diferença entre os tempos de reverberação. Com isso, conclui-se que os valores adotados na calibração, conduzem a bons resultados que assemelham com a real situação do anfiteatro, já que a diferença entre os $Tr_{médio}$ é de 0,04s, sendo assim, considerou-se o modelo numérico como calibrado.

4.2.2 Análise Numérica do Modelo

Em seguida da calibração do modelo numérico, tendo como referência o tempo de reverberação, avaliou-se o comportamento acústico do modelo para os parâmetros de nível sonoro e índice RASTI para a inteligibilidade da palavra. Os resultados foram comparados com valores encontrado por Paulino (2008) no modelo experimental e com o modelo numérico sem calibração.

Quanto ao nível sonoro, comparou-se as diferenças de níveis sonoros entre as primeiras e últimas fileiras do auditório, ou seja, para as posições de receptores R1-R5, R6-R10 e R11-R15, conforme Figura 4.5.

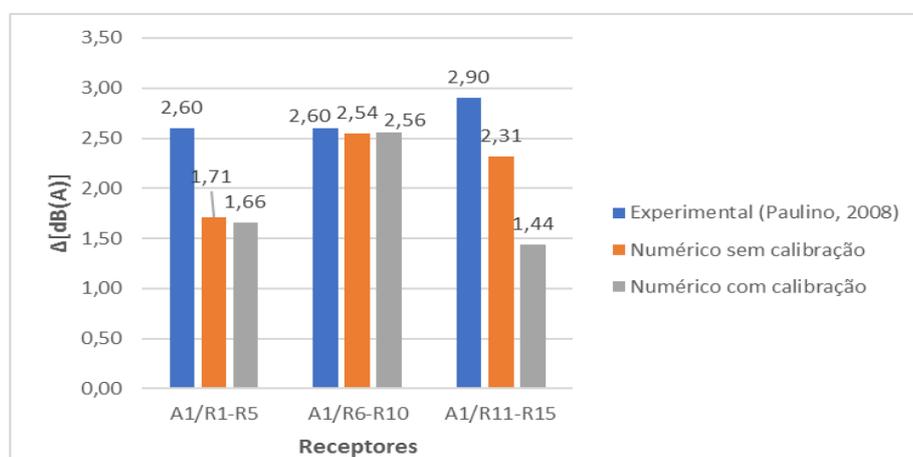


Figura 4.5 - Diferenças entre níveis sonoros entre receptores nas primeiras e últimas fileiras do auditório.

Verifica-se na figura acima que as diferenças entre níveis sonoros (Δ dB) dos receptores da primeira e última fileira do modelo experimental, além de serem iguais para os receptores R1-R5 e R6-R10, são maiores para que os modelos numéricos. Já em relação aos modelos numéricos, observa-se que o modelo sem calibração possui valores próximos de Δ dB em relação ao modelo experimental nos receptores R6-R10 e R11-R15, enquanto que possui Δ dB igual a 0,89dB(A) entre o experimental e o numérico calibrado para os receptores R1-R5.

Relativamente ao modelo numérico com calibração, percebe-se que os receptores R1-R5 e R11-R15 possuem valores de Δ dB próximos entre eles, o que é considerado bom já que são simétricos em relação a fonte sonora, e nota-se que, o valor de Δ dB encontrado para os receptores R6-R10 é próximo ao modelo experimental. Apesar dos resultados das diferenças de níveis sonoros do modelo numéricos com calibração serem inferiores ao modelo experimental, considera o modelo proposto como satisfatório.

Quanto ao índice de inteligibilidade da palavra RASTI, os resultados foram obtidos comparando os modelos numéricos com e sem calibração e o modelo experimental, considerando todos os 15 receptores e o auditório vazio, conforme Figura 4.6.

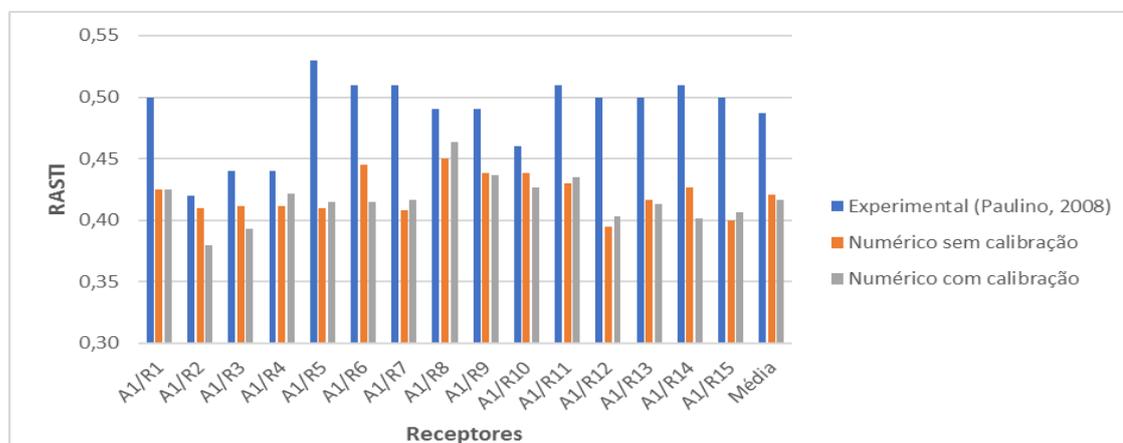


Figura 4.6 – Índice RASTI no auditório, resultantes dos ensaios e do modelo numérico.

Verifica-se que apesar da calibração do modelo numérico, este possui o mesmo valor médio de 0,42 que o modelo numérico sem calibração, enquanto que o método experimental possui valor médio de 0,49, apresentando então uma diferença de 0,07 entre o modelo experimental e o com calibração. Vale ressaltar que, apesar de comparar os resultados de RASTI entre o experimental e numérico, os valores obtidos pelo calculado geralmente são mais pessimistas que os valores obtidos experimentalmente. Observa-se que há uma pequena diferença de índices RASTI entre os receptores dos modelos com e sem calibração em comparação com o modelo experimental. Diante disso, apesar de todos os índices do modelo experimental serem superiores aos demais modelos, foi considerado razoável o modelo numérico com calibração quanto a este parâmetro de qualidade sonora.

4.3 Solução com Conceito de Acústica Variável – Auditório Laginha Serafim

Para a reabilitação do Auditório Laginha Serafim, definiu-se que o ambiente deverá ter uma solução com o conceito de acústica variável, porém neste caso a variação do tempo de reverberação na sala ocorre por outra motivação, a múltipla função do ambiente. Em resumo, propõe-se uma solução que consiga variar o tempo de reverberação, ou seja, a absorção sonora do auditório em função da atividade que está sendo realizada, podendo ser oratória, concerto, câmara ou ópera.

Assim, como ocorreu com o primeiro estudo de caso, essa variação do tempo de reverberação ocorrerá através de um painel tridimensional em formato de prisma triangular, com

60cmx60cm do piso até o teto, que será utilizado como revestimento de parede e, que deverá fornecer diferentes absorções em cada uma de suas faces, conforme mostra a Figura 3.7. Sendo assim, o painel tem um eixo central que fornece a rotação do prisma em 360°, e que possibilita a visualização das três faces, sendo que cada uma das faces possui uma solução de revestimento em placa de madeira ranhurada que fornece um tipo de absorção sonora diferente para o ambiente.

A variação da absorção sonora proporcionada pelas três soluções diferentes é necessária devido a variação da utilização do auditório, que demanda diferentes tempos de reverberação para melhor desempenho acústico do ambiente. A correção do tempo de reverberação do Auditório Laginha Serafim se torna necessário, pois o auditório é considerado muito reverberante para a função de oratória, segundo o artigo 10º-A, alínea a) do RRAE.

Com isso, visto os requisitos regulamentares propostos no artigo 10º-A, alínea a) do RRAE (2008), mencionados anteriormente, determina-se os valores de referência de $Tr_{\text{médio}}$ (500Hz, 1000Hz e 200Hz) para auditórios com função de oratória com base na expressão (2.6), quando sem ocupação. Sendo assim, calculando o $Tr_{\text{médio}}$ através da equação mencionada, tem-se para o auditório vazio, considerando seu volume de 1084m³, um valor limite de 0,84s.

Em relação a utilização do auditório com outras atividades, considerou-se as expressões (2.7) do tempo ótimo de reverberação máximo e mínimo, propostos por Arau-Puchades (1997), criando um intervalo de $Tr_{\text{médio}}$ a ser cumprido. Com isso, considerando o volume do auditório, tem-se os seguintes intervalos de tempo de reverberação médio: para concertos deve cumprir entre 1,51s e 1,30s; para câmara deve cumprir entre 1,30s e 1,08s; para ópera deve cumprir entre 1,28s e 0,96s; e, para teatro (oratória) deve cumprir entre 1,05s e 0,78s, porém este será limitado nos 0,84s proposto pelo artigo 10º-A, alínea a) do RRAE (2008), conforme Quadro 4.7.

Quadro 4.7 - Valores de referência de Tempo de Reverberação Médio para reabilitação do Auditório Laginha Serafim.

RRAE(2008)–Artigo10º-A	Valor de Referência: Higini Arau-Puchades (1997)			
Tempo de Reverberação Médio de referência				
Sala Vazia	Concertos	Câmara	Ópera	Teatro - Oratória
0,84	1,51 - 1,30	1,30 - 1,08	1,28 - 0,96	1,05 - 0,78 (limitando no 0,84 do RRAE)

4.4 Reabilitação com Conceito de Acústica Variável - Auditório Laginha Serafim

Posteriormente a calibração do modelo numérico e a avaliação rigor do modelo numérico, pôde-se prosseguir com o objetivo de propor uma solução de reabilitação com painel com o conceito de acústica variável para o auditório. Afim de cumprir com os requisitos regulamentares (RRAE, 2008) e valores de referência (Arau-Puchades, 1997), mencionados anteriormente, foi determinada uma solução fixa e, posteriormente, a solução variável com a intenção de determinar a eficácia acústica de uma solução variável (mais onerosa, mas previsivelmente conducente a uma melhoria na qualidade sonora) face a uma solução fixa (mais econômica, mas com qualidade sonora limitada).

4.4.1 Reabilitação – Solução Inicial Fixa

Após a definição dos valores de tempo de reverberação que o auditório deverá cumprir com as novas funções (oratória, concerto, câmara e ópera), determinou-se a fixação de alguns parâmetros para a reabilitação do auditório. Determinou-se que a reabilitação será fixada no teto intermediário (40% do fundo do teto), nas paredes do balcão (40% das paredes laterais e na parede paralela ao palco) e, em 60% paredes laterais e do fundo do primeiro pavimento. Nas paredes do balcão e no teto intermediário, optou-se por reabilitar por ser uma zona que, sem absorção, gera defeitos acústicos causados por ecos flutuantes e reflexões tardias.

Assim, a fim de cumprir com os requisitos do RRAE (2008) e os valores de referência (Arau-Puchades, 1997), foi estabelecido como solução inicial fixa (Figura 4.7), que 40% do fundo do teto intermediário será substituído por placas de 12,5mm de espessura em gesso cartonado perfurado, do tipo Cleaneo Akustik, com véu acústico e lã mineral e caixa de ar de 400mm, com taxa de perfuração de 15,5%, com diâmetro de 8mm e espaçamento de 18mm (0,55; 0,65; 0,60; 0,70; 0,60; 0,65) (Knauf, 2019). As paredes do balcão (40% das paredes laterais e na parede paralela ao palco), será revestida com BASWAphon FINE, ou seja, painéis de lã mineral calibrado e de peso reduzido colado sobre base sólida, com espessura de 30mm (0,11; 0,34; 0,81; 0,81; 0,68; 0,59) (BASWA Acoustic, 2018). No primeiro pavimento, em 60% das paredes do fundo e laterais, os materiais serão substituídos por painel de madeira CFRF 3/0-16, com 12mm de espessura e ranhura frontal de 3mm, sem perfuração no tarsoz, com tela acústica e lã mineral (0,20; 0,10; 0,10; 0,10; 0,15; 0,20) (Castelhana & Ferreira, 2019).

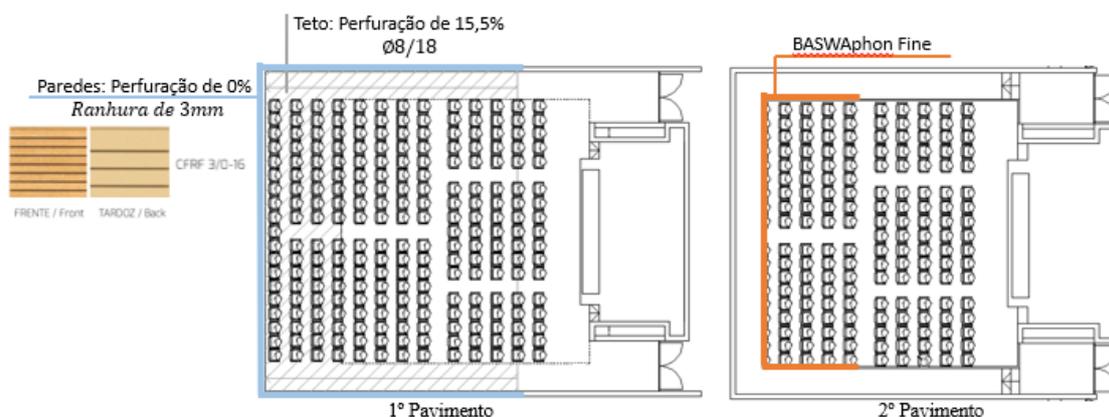


Figura 4.7 - Disposição de materiais para a solução inicial fixa da reabilitação do auditório.

4.4.2 Resultados Obtidos

Com a definição das novas soluções de revestimento para o teto intermediário e paredes do balcão e do primeiro pavimento, calcularam-se os tempos de reverberação para o auditório com essa proposta de reabilitação inicial fixa, conforme mostra no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 - Tempos de reverberação do auditório para reabilitação com solução inicial fixa.

Reabilitação	Tempo de Reverberação						Tr médio (500,1000,2000Hz) (s)	Higini Arau- Puchades
	125	250	500	1000	2000	4000		Tr Referência para Concertos
Solução Fixa	1,89	1,60	1,40	1,37	1,30	1,09	1,36	1,51 - 1,30

Observa-se no quadro acima que para essa solução inicial, considerando o valor de referência de $Tr_{médio}$ para sala de concertos entre 1,51s e 1,30s, o auditório cumpre este requisito pois tem o resultado de 1,36s, porém não cumpre o requisito regulamentar (RRAE, 2008) de 0,84s. Nota-se ainda que, a reabilitação com essa solução inicial gerou uma redução significativa do tempo de reverberação médio do auditório em 0,88s em relação ao modelo numérico calibrado, ou seja, passou de 2,24s, como mostrado anteriormente, para 1,36s.

4.4.2.1 Nível Sonoro

Após definição da solução de reabilitação inicial fixa, avaliou-se o nível sonoro em relação a posição da fonte 1 e aos 15 receptores posicionados na plateia para o anfiteatro vazio (modelo numérico calibrado) e o modelo numérico com a reabilitação inicial, conforme Figura 4.8.

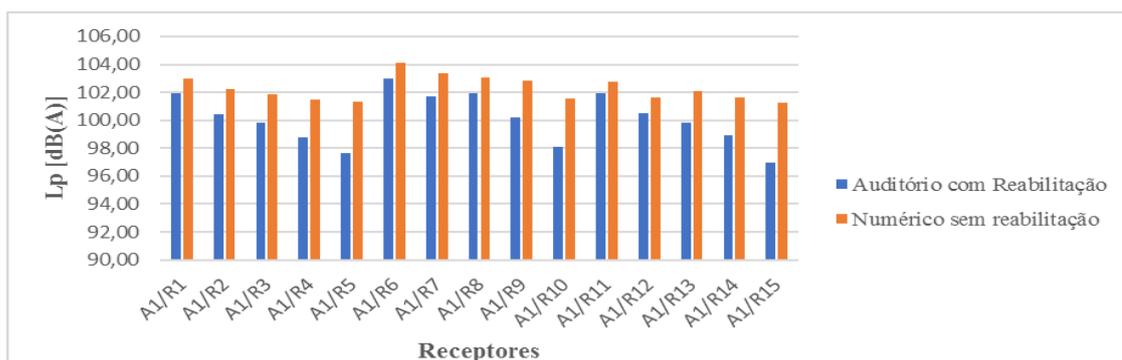


Figura 4.8 - Valores de níveis sonoros obtidos para o auditório com a solução com reabilitação e o modelo numérico sem reabilitação.

Ao analisar a Figura 4.8, conclui-se que os valores para o anfiteatro com reabilitação são menores ao comparado com o modelo numérico do anfiteatro sem reabilitação, o que era esperado, visto que adicionou-se materiais com absorção na sala. Observa-se que as maiores diferenças de resultados de níveis sonoros entre os dois modelos se encontram nos receptores R5, R10 e R15, o que pode ser justificado, já que estes se encontram ao fundo no anfiteatro próximos onde foi introduzido as soluções de reabilitação, ou seja, nota-se que à medida que os receptores se aproximam das soluções de reabilitação, há uma redução do nível sonoro.

Ao comparar as variações de níveis sonoros entre primeiras e últimas fileiras (R1-R5, R6-R10 e R11-R15), para o anfiteatro sem reabilitação tem-se, respectivamente, 1,66 dB(A), 2,56 dB(A) e 1,44 dB(A), enquanto que para o anfiteatro com reabilitação proposta tem-se, respectivamente, 4,32 dB(A), 4,87 dB(A), 4,99 dB(A), ou seja, com a solução de reabilitação do anfiteatro obteve-se um decréscimo mais elevado e significativo entre receptores das primeiras e últimas fileiras.

4.4.2.2 RASTI

Para simulação da reabilitação inicial fixa, calculou-se o índice RASTI em todos os receptores para o anfiteatro vazio (modelo numérico calibrado) e comparou-se com o anfiteatro com reabilitação, conforme Figura 4.9.

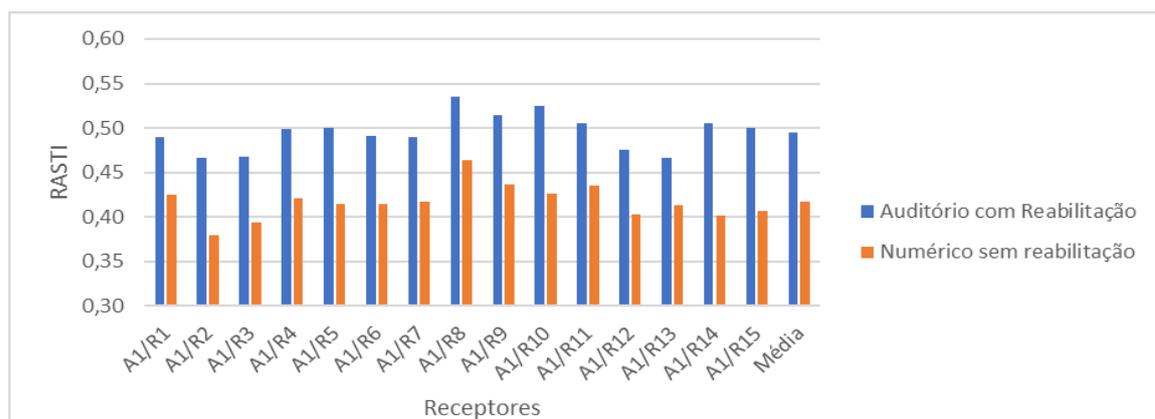


Figura 4.9 - Valores do índice RASTI obtidos para o auditório com e sem reabilitação.

Verifica-se na figura acima que, como esperado, os valores para o auditório com reabilitação são melhores em relação ao mesmo sem reabilitação, que era avaliado com uma inteligibilidade pobre tendo um índice médio de RASTI entre os 15 receptores de 0,42. Apesar do aumento dos valores do índice obtidos com a reabilitação, o auditório ganha valores razoáveis na inteligibilidade ainda não sendo considerado bons, pois o valor médio entre os 15 receptores é igual a 0,50, visto como no limite da inteligibilidade aceitável para esse parâmetro.

4.4.3 Reabilitação - Solução Variável

Devido ao fato de a reabilitação inicial não cumprir o requisito regulamentar (RRAE, 2008) para o auditório, e apenas cumprir o valor de referência de tempo de reverberação para a utilização como sala de concerto, foi proposta uma solução de reabilitação com acústica variável para que os painéis integrados na solução de acústica variável alterem o tempo de reverberação da sala, visando cumprir os requisitos os outros tipos de utilização propostos. A partir disso, definiu-se como fixo o novo material do teto intermediário com as placas de gesso com perfuração 15,5%, e o revestimento em BASWaphon nas paredes do balcão (mencionado anteriormente) (Knauf, 2019). Com isso, determinou-se que uma das faces do painel de acústica variável será a solução fixa que cumpre uma utilização e, que as outras faces devem ter coeficientes de absorção diferentes para as outras funções que o auditório deve cumprir.

Assim, foi proposto que uma das faces do painel cumpra o valor recomendado de $Tr_{médio}$ para salas para câmara e ópera (1,30s-1,08s e 1,28s-0,96s), e a outra face para a atividade de teatro para a função de oratória, obtendo $Tr_{médio}$ próximo a 0,84s conforme o artigo 10º-A do RRAE (2008). Nesta primeira face, foi considerado que o painel estará disposto na parede de forma que as faces estejam lado a lado, sendo a visualização do público em relação ao painel

seja de um revestimento único e contínuo. Diante disso, conforme Figura 4.10, os painéis das paredes laterais e do fundo do primeiro pavimento, são de madeira CFRF 3/8-16/32, com 12mm de espessura e ranhura de 3mm, e no tardo com perfuração de 4,16% e diâmetro de 8mm, com tela acústica e lã mineral (0,20; 0,85; 0,90; 0,50; 0,35; 0,35) (Castelhano & Ferreira, 2019).

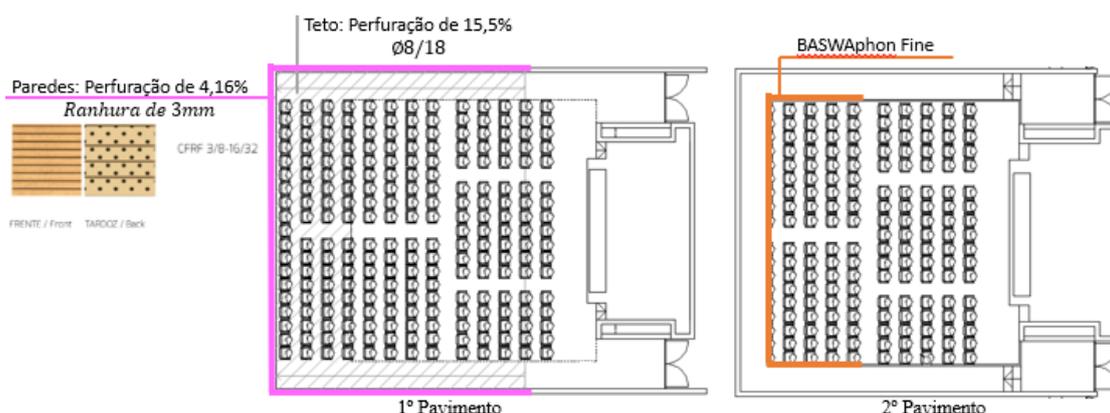


Figura 4.10 - Disposição de materiais no auditório para a solução de reabilitação com o conceito de acústica variável para segunda face do painel.

Definida uma solução para uma das faces do painel, calculou-se os tempos de reverberação para o auditório vazio, a fim de verificar se cumpre o valor de referência (Arau-Puchades, 1997), conforme Quadro 4.9.

Quadro 4.9 - Tempos de reverberação para o auditório com segunda solução para compor painel de acústica variável.

Reabilitação	Tempo de Reverberação						Tr médio (500,1000,2000Hz) (s)	Higini Arau-Puchades
	125	250	500	1000	2000	4000		Tr Referência para Câmara
Solução 1	1,85	1,33	1,22	1,29	1,25	1,07	1,25	1,30 - 1,08

Conforme mostra no quadro acima, percebe-se que esse painel de madeira ranhurado cumpre o requisito entre 1,30s e 1,08s para sala com música de câmara, obtendo resultado de 1,25s. Visto que o material apresentado acima, não cumpre o requisito regulamentar, disposto no artigo 10º-A do RRAE (2008) para auditórios, foi determinado outro revestimento com uma absorção sonora maior para compor a terceira face do painel, visando alcançar o valor próximo aos 0,84s propostos no artigo. Neste caso, o material escolhido para a terceira face foi o painel de madeira microperfurado CFmicro, com 12mm de espessura, perfuração de 2,2% com diâmetro de 0,5mm e espaçamento entre furos de 2mm, com tela acústica e lã

mineral (0,25; 0,75; 0,90; 0,90; 0,90; 0,90) (Castelhano & Ferreira, 2019), conforme mostra a disposição dos materiais no auditório na Figura 4.11.

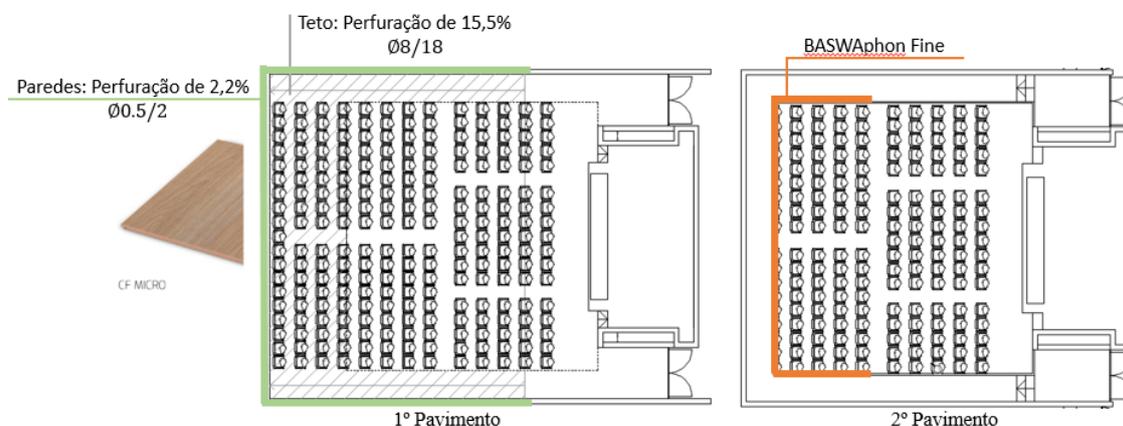


Figura 4.11 - Disposição de materiais no auditório para a solução de reabilitação com o conceito de acústica variável para terceira face do painel.

Definido outra face do painel, calculou-se os tempos de reverberação com esta solução para a terceira face do painel, conforme Quadro 4.10.

Quadro 4.10 - Tempos de reverberação para o auditório com terceira solução para compor painel de acústica variável,

Reabilitação	Tempo de Reverberação						Tr médio (500,1000,2000Hz) (s)	Higini Arau- Puchades
	125	250	500	1000	2000	4000		Tr Referência para Ópera
Solução 2	1,82	1,36	1,23	1,19	1,22	1,01	1,21	1,28 - 0,96

Diante dos dados acima, observa-se que para a utilização da sala como ópera, esta solução de painel de madeira microperfurada cumpre o requisito entre 1,28s e 0,96s, pois obteve resultado de 1,21s. Visto que a escolha deste painel microperfurado (Castelhano & Ferreira, 2019) foi realizada em função do seu alto coeficiente de absorção nas médias e altas frequências, esperava-se que este cumprisse o requisito regulamentar do RRAE (2008) de 0,84s, o que não ocorreu. Diante disso, conclui-se que este resultado pode estar sendo influenciado pelo paralelismo das paredes e pela limitação do número de raios (máximo 5000) que a versão estudantil do software CATT Acoustic possui.

Assim, com a terceira face estabelecida, define-se a composição das três faces do painel tridimensional com acústica variável, para três das quatro possibilidades de utilizações propostas (Concerto, Música de câmara e Ópera), visto que este não cumpre tanto o requisito

de 0,84s calculado a partir do artigo 10^o-A para auditórios (RRAE, 2008), quanto os valores de referência entre 1,05s e 0,78s propostos por Arau-Puchades (1997).

4.4.4 Resultados Obtidos

Após análises dos resultados de tempo de reverberação encontradas para as soluções propostas para reabilitação do auditório, tendo em vista o não cumprimento do requisito regulamentar mencionado, determinou-se que, para o auditório, o painel com o conceito de acústica variável será composto por três faces que variam a absorção da sala em função das utilizações de Concerto, Música de câmara e Ópera, eliminando a função de oratória.

Diante disso, após definição dos materiais escolhidos para o painel de acústica variável, pode-se esquematizar a composição das três faces da solução, conforme mostra a Figura 4.12. Diante disso, ficou determinado que uma face será a Solução Fixa com material em painel de madeira CFRF 3/0-16, com 12mm de espessura e ranhura frontal de 3mm, sem perfuração no tardo, com tela acústica e lã mineral; a segunda face será a Solução 1 com material em painel de madeira CFRF 3/8-16/32, com 12mm de espessura e ranhura de 3mm, e no tardo com perfuração de 4,16% e diâmetro de 8mm, com tela acústica e lã mineral; e a terceira face será a Solução 2 com material em painel de madeira microperfurado CFmicro, com 12mm de espessura, perfuração de 2,2% com diâmetro de 0,5mm e espaçamento entre furos de 2mm, com tela acústica e lã mineral (Castelhano & Ferreira, 2019). É importante ressaltar que os resultados obtidos no software não consideram o formato da caixa de ar que possui grande influência sobre o painel.

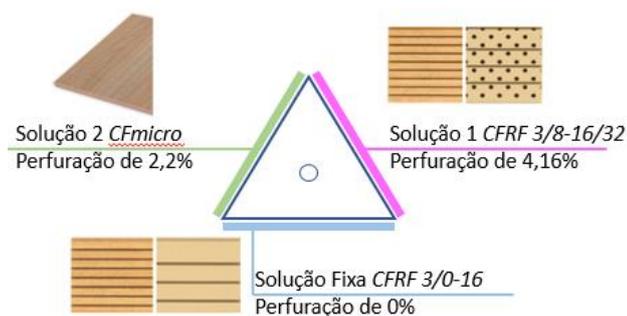


Figura 4.12 - Representação esquemática das faces do painel tridimensional com acústica variável para o auditório.

4.4.4.1 Nível Sonoro

Após a definição das soluções de reabilitação com acústica variável propostas, comparou-se os valores obtidos para a solução fixa e para as soluções com a conceito de acústica variável quanto aos parâmetros de qualidade sonora, sendo eles o nível sonoro, o tempo de reverberação médio e o índice de inteligibilidade da palavra RASTI. Diante disso, avaliou-se o nível sonoro em relação a posição da fonte 1 e aos 15 receptores posicionados na plateia para os diversos tipos de utilização do Auditório Laginha Serafim, conforme Figura 4.13.

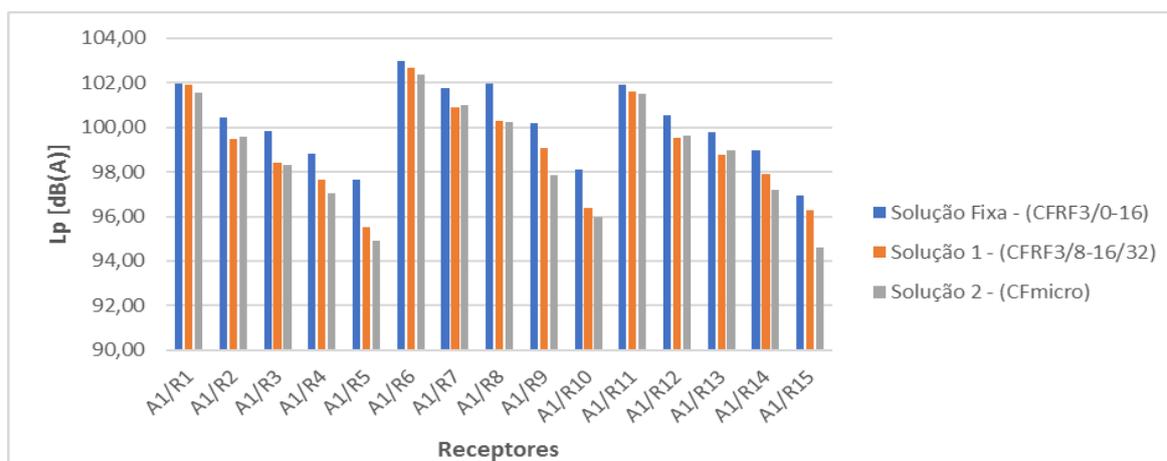


Figura 4.13 - Valores de níveis sonoros obtidos para solução fixa e variável (Solução 1 e 2) para o auditório.

Ao analisar os resultados obtidos para o auditório, na Figura 4.13, observa-se que as diferenças dos valores de nível sonoro entre as primeiras e últimas fileiras (R1-R5, R6-R10 e R11-R15), para a solução inicial fixa proposta são: 4,32 dB(A), 4,87 dB(A) e 4,99 dB(A) e, para as soluções com o conceito de acústica variável, tem-se para a Solução 1: 6,39 dB(A), 6,31 dB(A) e 5,36 dB(A) e, a Solução 2: 6,66 dB(A), 6,41 dB(A) e 6,87 dB(A). Com isso, percebe-se que a solução inicial fixa possui diferenças de níveis sonoros inferiores em relação a solução variável, para todos os receptores.

Verifica-se ainda que, em todos os receptores, a solução fixa possui valores de níveis sonoros superiores em relação as soluções com o conceito de acústica variável (Solução 1 e 2). Observa-se na Figura 4.13, que as Soluções 1 e 2 possuem valores de níveis sonoros ligeiramente próximos, com exceção do receptor R15, que possui uma maior diferença de nível sonoro entre a Solução 1 e 2. Nota-se que a Solução 1 possui menor valor de nível sonoros no receptor R15, enquanto que a Solução Fixa e a Solução 2 possuem menores valores de níveis sonoros no receptor R5, ambos receptores estão posicionados nas extremidades do fundo da sala, estando mais próximos das reabilitações realizadas.

4.4.4.2 RASTI

Para o índice RASTI, analisou-se a inteligibilidade da palavra para as soluções de reabilitação com a solução de acústica variável em relação a solução fixa, conforme apresentado na Figura 4.14.

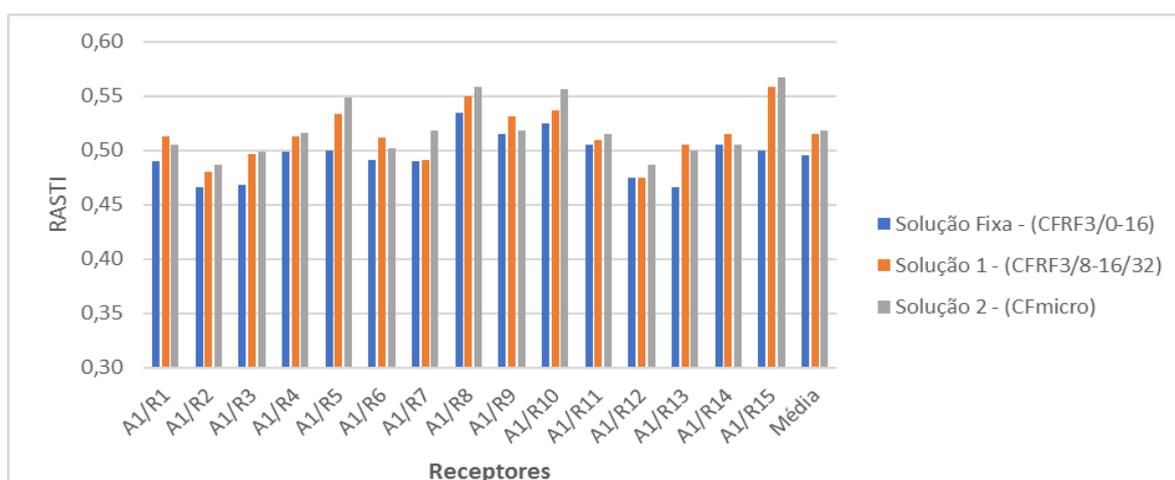


Figura 4.14 - Valores do índice RASTI obtidos para o auditório reabilitado com a solução de acústica variável.

Verifica-se ao analisar a Figura 4.14 que os valores mais elevados do índice RASTI, maioritariamente, se localizam nos últimos receptores que, por sua vez, estão próximos aos locais onde ocorreram maior reabilitação. Com as soluções adotadas, os resultados médios do índice RASTI encontrados para cada tipo de ocupação são: para Solução Fixa, o valor é igual a 0,50, para a Solução o valor é igual a 0,51 e, para a Solução 2, o valor é igual a 0,52. De acordo com Isbert (1998), estes valores do índice RASTI, ainda que não sejam bons, são consideráveis como aceitável a inteligibilidade da palavra no auditório.

Para melhor análise das soluções propostas na reabilitação do auditório, comparou-se os valores obtidos relacionando os parâmetros de tempo de reverberação e índice RASTI para a solução inicial fixa e a solução com o conceito de acústica variável (Quadro 4.11).

Quadro 4.11 - Valores de Tempo de reverberação médio e RASTI obtidos para a reabilitação com solução fixa e variável.

Reabilitação com Acústica Variável	Tempo de Reverberação Médio	RASTI
Solução Fixa	1,36s	0,50
"Solução 1" - (CFRF3/8-16/32)	1,25s	0,51
"Solução 2" - (CFmicro)	1,21s	0,52

Nota-se que, apesar dos valores de tempo de reverberação serem diferentes devido os novos tipos de utilização proposto ao auditório, ao relacioná-los com o índice RASTI, percebe-se que as soluções não conduzem melhorias significativas quanto a inteligibilidade da palavra, variando apenas 0,01s. Observa-se que, para o auditório, a solução com o conceito de acústica variável nas configurações de reabilitação propostas, auxilia no cumprimento dos valores de referência utilizados, porém não produz resultados satisfatórios no cumprimento dos requisitos regulamentares (RRAE, 2008). Sendo assim, conclui-se, neste caso, que para um ambiente com um volume interior maior como o auditório, seria necessário que a solução de painel reconfigurável para este tipo de reabilitação variável revestisse uma maior área de parede.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Neste trabalho foi realizado um estudo prévio das características que um painel acústico reconfigurável deve possuir para modificar a absorção sonora de um ambiente, e melhorar o desempenho acústico de salas. Diante disso, foi proposto, para dois estudos de caso hipotéticos, a implementação de um painel acústico tridimensional em formato de prisma triangular com rotação central, que possui suas três faces com diferentes soluções de materiais e de coeficientes de absorção. Assim, foi definido que este painel ao ser implementado pode proporcionar a alteração da absorção sonora na sala em função da variação da ocupação da sala e da utilização da mesma. Com isso, para avaliar o desempenho acústico deste painel em uma sala existente, foi estudado, através da utilização do software CATT Acoustic – versão estudantil, a implementação da solução em dois ambientes com comportamentos acústicos distintos, o Anfiteatro AFD3.1 e o Auditório Laginha Serafim, localizados no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

O Anfiteatro AFD3.1 foi escolhido como um dos estudos de caso por não cumprir o valor limite do requisito regulamentar RRAE, aprovado pelo Decreto-Lei nº 129/2002 de 11/05, alterado pelo Decreto-Lei nº 96/2008. A partir disso, primeiramente, realizou-se a modelagem e simulação acústica em software de traçados de raios, CATT Acoustic. O modelo foi calibrado através de comparação do tempo de reverberação com resultados obtidos experimentalmente por Barbosa (2009) ajustando os coeficientes de absorção, de modo a obter um modelo com um maior grau de precisão. Posteriormente, foi avaliado o seu rigor em relação ao nível sonoro e ao índice RASTI. Apesar destes indicadores apresentarem algumas diferenças em relação aos valores experimentais, os resultados obtidos para os parâmetros de qualidade acústica possibilitaram avaliar o modelo numérico do anfiteatro, considerando-o satisfatório.

Com o intuito de melhorar o desempenho acústico do anfiteatro e corrigir defeitos acústicos existentes, foram estudados os efeitos da reabilitação com o conceito de acústica variável. Este estudo foi realizado a partir de simulação numérica da implementação do painel acústico, comparando os efeitos e ganhos de qualidade sonora que a solução variável introduz no ambiente em comparação a uma solução fixa, ao alterar a absorção sonora da sala em função da variação da ocupação da plateia. Os resultados obtidos para a solução variável permitiram verificar que, no que diz respeito ao cumprimento do requisito regulamentar RRAE (2008), é

eficaz pois cumpre o valor limite de tempo de reverberação médio para o anfiteatro vazio, obtendo 1,08s e, cumpre o valor recomendado de 0,78s quando ocupado, para todas as ocupações da plateia proposta. Ao comparar os resultados de tempo de reverberação médio da solução variável com a solução fixa, percebe-se que as diferenças são mínimas entre os valores obtidos pelas soluções, tendo apenas uma ligeira melhoria para as variações de ocupação, aumentando o $Tr_{médio}$ para 2/3 e 3/3 de ocupação, e diminuindo o $Tr_{médio}$ para 1/3 de ocupação, em relação aos resultados da solução fixa.

Em relação aos efeitos acústicos que o anfiteatro adquire ao utilizar essa solução variável ao invés de uma solução fixa, percebeu-se que a solução variável não proporciona alterações significativas em relação ao nível sonoro e ao índice RASTI nas configurações de ocupação propostas. Com isso, concluiu-se sobre este estudo de caso que não vale o custo-benefício da implementação da solução variável, visto que é uma solução com um maior investimento que não compensa a mínima melhoria dos parâmetros, e os ganhos poucos significativos no desempenho acústico do Anfiteatro AFD3.1, proporcionados pela solução variável.

Relativamente ao Auditório Laginha Serafim, foi escolhido como o outro estudo de caso por não cumprir o valor limite do requisito regulamentar RRAE, aprovado pelo Decreto-Lei nº 129/2002 de 11/05, alterado pelo Decreto-Lei nº 96/2008 e ser um espaço de volumetria superior, podendo adaptar-se a um espaço multiusos. A partir disso, primeiramente, realizou-se a modelagem e simulação acústica em software de traçados de raios, o CATT Acoustic – versão estudantil, que possibilitou através da calibração dos coeficientes de absorção, obter um modelo com um maior grau de precisão em relação aos resultados obtidos experimentalmente por Paulino (2008), sendo, posteriormente, avaliado o seu rigor em relação aos nível sonoro e ao índice RASTI.

Neste estudo de caso, diferente do Anfiteatro AFD3.1, houve uma maior preocupação na calibração dos coeficientes de absorção das cadeiras que possuem pouco estofamento, mas que têm uma maior influência sobre a absorção da sala. Apesar de apresentar algumas diferenças, os resultados obtidos para os parâmetros de qualidade acústica possibilitaram avaliar o modelo numérico do auditório, considerando-o rigoroso e satisfatório em relação ao modelo experimental.

Face a necessidade de melhorar a qualidade sonora do auditório, realizou-se o estudo dos efeitos da implementação do painel acústico com o conceito de acústica variável, para que além do uso para oratória, a variação da absorção sonora agregue novas utilizações para o espaço, como sala de concerto, música de câmara e ópera. Os resultados obtidos para a implementação da solução variável não foram satisfatórios, visto que o auditório não consegue cumprir o valor limite do requisito regulamentar RRAE (2008) de 0,84s, obtendo

um mínimo de 1,21s com a utilização de um painel microperfurado que possui características muito absorventes. Com isso, essa solução de painel com o conceito de acústica variável, com as configurações propostas, não permite obter bons resultados para a utilização da sala para atividades de oratória. Visto que com a utilização deste painel microperfurado esperava-se que a solução proporcionasse uma melhoria nos resultados obtidos em relação a ‘Solução 1’ associou-se esse “mau” resultado pode ao fato de estar sendo influenciado pelo paralelismo das paredes e pela limitação da quantidade de raios da versão estudantil do software CATT Acoustic que foi utilizada, já que para um ambiente com um volume como o do auditório seria necessário uma quantidade de raios maior que 5000.

A solução variável possibilita o cumprimento dos valores de referência de tempo de reverberação médio sugeridos por Arau-Puchades (1997) em relação a utilização como concertos, música de câmara e ópera, porém as alterações dos parâmetros de qualidade sonora como o RASTI e o nível sonoro são mínimas e não são boas, apresentando um auditório com uma inteligibilidade da palavra no limite do considerado aceitável por Isbert (1998). Em relação aos efeitos acústicos que o auditório adquire ao utilizar essa solução variável ao invés de uma solução fixa, percebeu-se que a solução variável apesar de ligeiramente alterar os tempos de reverberação, não proporciona alterações significativas em relação ao nível sonoro e ao índice RASTI nas configurações de reabilitação que foram propostas.

Com isso, concluiu-se que visto que os resultados obtidos não cumpriram o esperado, estes podem estar sendo influenciados pela limitação do número de raios do cálculo realizado pela versão estudantil do software. Além disso, neste estudo de caso, por se tratar de um ambiente com um volume maior, acredita-se que seria necessária uma maior área de absorção a ser utilizada com a solução variável. Logo, sobre este estudo de caso, percebe-se que nas configurações de reabilitação propostas, com os resultados obtidos frente as limitações do software, a solução variável não compensa ser implementada. Apesar de ser uma solução com um maior investimento que introduz melhorias no tempo de reverberação, esta gera resultados com melhorias mínimas, ainda que ruins, em relação aos outros parâmetros, assim, os ganhos são poucos significativos no desempenho acústico do Auditório Laginha Serafim.

5.2 Trabalhos futuros

Diante do exposto sobre o tema, espera-se que este trabalho seja um ponto de partida para futuros trabalhos sobre reabilitação utilizando o conceito da acústica variável em salas, e que, as informações sobre a acústica variável apresentadas neste trabalho, gerem uma maior investigação sobre as melhorias no condicionamento acústico de salas com a implementação de soluções como a apresentada.

Visto que o Anfiteatro AFD3.1 necessita de uma reabilitação e a solução variável não gerou ganhos significativos que justificasse a implementação da solução, espera-se que trabalhos futuros proponham novas reabilitações a este ambiente que englobam o tema da acústica variável. Pensa-se ainda que poderia ser interessante um estudo acerca de outras configurações do painel acústico nos dois estudos de caso, de forma que ele acrescentasse absorção de dois materiais a vista e que proporcionasse a difusão ao ser posicionado com duas faces do prisma triangular a mostra.

Em relação ao Auditório Laginha Serafim, sugere-se avaliar a influência do número de raios no software CATT Acoustic na modelagem das soluções propostas. Pensa-se ainda que poderia propor a avaliação de uma maior área de absorção através da implementação do painel acústico em mais paredes na reabilitação do Auditório Laginha Serafim. E estudar diferentes arquiteturas de auditórios que possibilitam a utilização de mais painéis acústicos para obter uma influência de uma maior área de absorção.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arau-Puchades, H. (1997). “Dependencia del tiempo de reverberación com el tamaño de audiència em salas de pública concurrencia”. *Revista de Acústica*, 28, 7-12.

Barbosa, A.T. (2009). “Condicionamento Acústico de Espaços – Estudo de Dois Anfiteatros”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil na Especialidade de Construções. DEC - Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Coimbra.

Barron, Michael. (2009). “Acoustics, Auditorium Design, Architectural”.

BASWA Acoustic (2018). System data sheet BASWAphon Fine. BASWA Acoustic AG.

Castelhano & Ferreira (2019). *Acústica XXI – Sistemas de Condicionamento Acústico*. Catálogo comercial. Indústria de Tectos Falsos e divisórias, S.A .

Cox, T.J.; D’Antonio, P.: “Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application”. Spon Press, 2nd Edition, 2009.

Egan, M. D., Quirt, J. D., and Rousseau, M. Z. (1989). “Architectural acoustics”.

Ginn, K.B. (1978). “Architectural acoustics”. Briel&Kjaer, 2nd Edition.

Godinho, L.; Amado-Mendes, P.; Patraquim, R.; Jordão, A.C. “Avaliação do comportamento acústico de painéis ressonantes incorporando telas acústicas”. *Tecniacústica 2011*, Cáceres, Espanha, Actas em CD-Rom, 26-28 Outubro, 2011.

Guedes, S.V. (2016). “Lote da Estação Velha Ensaio Sobre Arquitetura Evolutiva, Flexível e Adaptável”. Universidade do Porto.

Isbert, A. C. (1998). “Diseño acústico de espacios arquitectónicos (Vol. 4). Univ. Politèc. de Catalunya”.

Knauf (2019). D.12pt Teto Knauf Cleaneo Akustik Ficha Técnica.

Mareze, P. H. (2013). “Análise da influência da microgeometria na absorção sonora de materiais porosos de estrutura rígida”. Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

Patraquim, Ricardo; Godinho, Luís; Amado Mendes, Paulo, “Análise da absorção sonora de painéis ranhurados e perfurados incorporando espumas sintéticas”, VIII Congresso Ibero-Americano de Acústica, Évora, Actas em CD-Rom, Outubro de 2012.

Paulino, N.M.V. (2008). “Condicionamento Acústico de Espaços – Estudo do Auditório Laginha Serafim”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil na Especialidade de Construções, DEC - Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Coimbra.

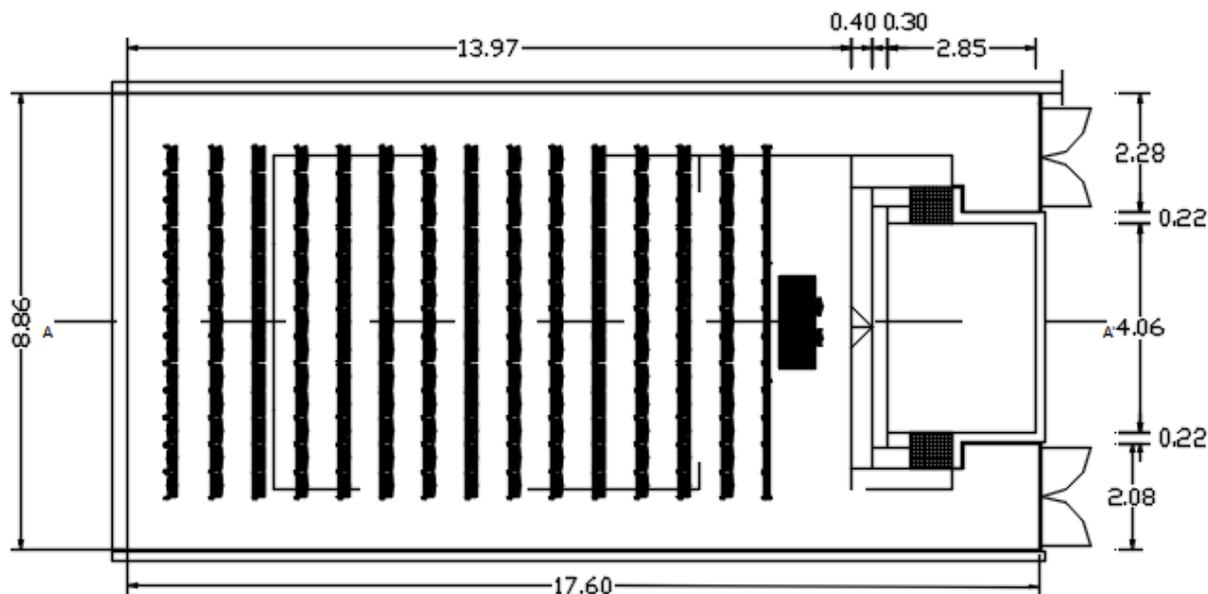
RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, aprovado pelo Decreto – Lei nº.129/2002 de 11/05, com a nova redacção dada pelo Decreto-Lei nº96/2008 de 09/06.

Stephens, R.W.B; Bate, A.E. (1950). “Wave Motion and Sound”.

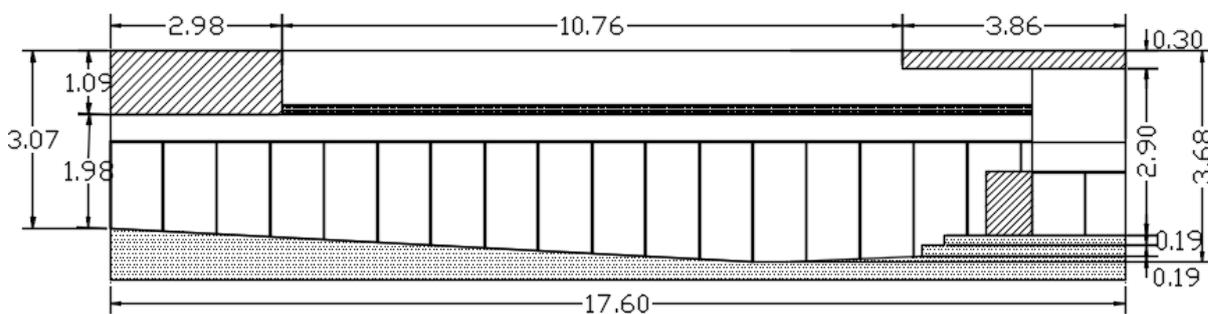
Tadeu, A.; Mateus, D.; António, J.; Godinho, L.; Mendes, P. (2010). “Acústica Aplicada”. Textos de apoio à disciplina de opção ‘Acústica Aplicada’, DEC - Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Coimbra.

ANEXO I – Plantas, cortes e fotografias do Anfiteatro AFD3.1.

1 Planta do Anfiteatro AFD 3.1



2 Corte A-A'



3 Fotografias



ANEXO II – Resultados obtidos da avaliação do modelo numérico do Anfiteatro AFD3.1.

1 Tempo de Reverberação (s)

<i>Frequência (Hz)</i>	<i>125</i>	<i>250</i>	<i>500</i>	<i>1000</i>	<i>2000</i>	<i>4000</i>	<i>Tr 500,1000,2000 (s)</i>
<i>Numérico sem calibração</i>	1,24	1,41	1,71	1,75	1,96	1,51	1,81
<i>Numérico com calibração</i>	1,36	1,71	2,02	1,96	1,78	1,36	1,92

2 Nível Sonoro

<i>Receptor</i>	<i>Sem calibração</i>	<i>Com calibração</i>	<i>Receptor</i>	<i>Sem calibração</i>	<i>Com calibração</i>
<i>R1</i>	105,59	106,71	<i>R9</i>	105,10	105,29
<i>R2</i>	106,19	107,14	<i>R10</i>	104,18	105,07
<i>R3</i>	105,70	106,78	<i>R11</i>	104,75	105,27
<i>R4</i>	106,02	105,82	<i>R12</i>	104,67	104,48
<i>R5</i>	105,83	106,49	<i>R13</i>	103,99	104,70
<i>R6</i>	105,38	105,88	<i>R14</i>	103,83	105,01
<i>R7</i>	105,40	105,58	<i>R15</i>	103,40	104,62
<i>R8</i>	105,03	105,65			

3 RASTI

<i>Receptor</i>	<i>Sem calibração</i>	<i>Com calibração</i>	<i>Receptor</i>	<i>Sem calibração</i>	<i>Com calibração</i>
<i>R1</i>	0,49	0,48	<i>R9</i>	0,47	0,45
<i>R2</i>	0,51	0,48	<i>R10</i>	0,45	0,45
<i>R3</i>	0,50	0,48	<i>R11</i>	0,46	0,46
<i>R4</i>	0,47	0,45	<i>R12</i>	0,47	0,45
<i>R5</i>	0,47	0,44	<i>R13</i>	0,46	0,46
<i>R6</i>	0,47	0,45	<i>R14</i>	0,48	0,44
<i>R7</i>	0,47	0,47	<i>R15</i>	0,47	0,46
<i>R8</i>	0,46	0,45	<i>Média</i>	0,47	0,46

ANEXO III – Resultados obtidos da avaliação do modelo numérico com reabilitação inicial fixa do Anfiteatro AFD3.1.

1 Tempo de Reverberação (s)

<i>Frequência (Hz)</i>	<i>125</i>	<i>250</i>	<i>500</i>	<i>1000</i>	<i>2000</i>	<i>4000</i>	<i>Tr</i> <i>(500,1000,2000Hz)</i> <i>(s)</i>
<i>Auditório Vazio</i>	1,09	0,96	1,08	1,05	1,10	0,89	1,08
<i>Auditório 1/3 da Ocupação</i>	0,98	0,80	0,83	0,79	0,83	0,73	0,82
<i>Auditório 2/3 da Ocupação</i>	0,92	0,71	0,76	0,73	0,75	0,64	0,75
<i>Auditório Lotação Total</i>	0,88	0,71	0,77	0,75	0,74	0,65	0,75

2 Nível Sonoro

<i>Receptor</i>	<i>Auditório Vazio</i>	<i>Receptor</i>	<i>Auditório 1/3 da Ocupação</i>	<i>Receptor</i>	<i>Auditório 2/3 da Ocupação</i>	<i>Receptor</i>	<i>Auditório Lotação Total</i>
<i>R1</i>	104,96	<i>R1</i>	103,65	<i>R1</i>	103,73	<i>R1</i>	103,45
<i>R2</i>	105,74	<i>R2</i>	104,18	<i>R2</i>	103,83	<i>R2</i>	103,86
<i>R3</i>	105,37	<i>R3</i>	104,38	<i>R3</i>	103,87	<i>R3</i>	104,51
<i>R4</i>	104,48	<i>R4</i>	102,70	<i>R4</i>	102,10	<i>R4</i>	101,88
<i>R5</i>	104,66	<i>R5</i>	101,88	<i>R5</i>	101,91	<i>R5</i>	101,25
<i>R6</i>	104,55	<i>R6</i>	102,32	<i>R6</i>	101,66	<i>R6</i>	101,45
<i>R7</i>	103,42	<i>R7</i>	102,21	<i>R7</i>	99,88	<i>R7</i>	99,75
<i>R8</i>	103,45	<i>R8</i>	102,09	<i>R8</i>	99,80	<i>R8</i>	100,48
<i>R9</i>	103,35	<i>R9</i>	101,55	<i>R9</i>	100,39	<i>R9</i>	100,38
<i>R10</i>	101,30	<i>R10</i>	101,02	<i>R10</i>	98,95	<i>R10</i>	98,91
<i>R11</i>	102,59	<i>R11</i>	101,05	<i>R11</i>	99,78	<i>R11</i>	99,52
<i>R12</i>	101,59	<i>R12</i>	100,31	<i>R12</i>	98,75	<i>R12</i>	98,84
<i>R13</i>	100,47	<i>R13</i>	98,97	<i>R13</i>	98,35	<i>R13</i>	97,23
<i>R14</i>	100,75	<i>R14</i>	99,90	<i>R14</i>	99,29	<i>R14</i>	98,16
<i>R15</i>	100,28	<i>R15</i>	99,07	<i>R15</i>	99,33	<i>R15</i>	97,41

3 RASTI

<i>Receptor</i>	<i>Auditório Vazio</i>	<i>Receptor</i>	<i>Auditório 1/3 da Ocupação</i>	<i>Receptor</i>	<i>Auditório 2/3 da Ocupação</i>	<i>Receptor</i>	<i>Auditório Lotação Total</i>
<i>R1</i>	0,54	<i>R1</i>	0,58	<i>R1</i>	0,61	<i>R1</i>	0,60
<i>R2</i>	0,54	<i>R2</i>	0,58	<i>R2</i>	0,60	<i>R2</i>	0,62
<i>R3</i>	0,55	<i>R3</i>	0,59	<i>R3</i>	0,59	<i>R3</i>	0,62
<i>R4</i>	0,54	<i>R4</i>	0,58	<i>R4</i>	0,59	<i>R4</i>	0,59
<i>R5</i>	0,52	<i>R5</i>	0,57	<i>R5</i>	0,59	<i>R5</i>	0,58
<i>R6</i>	0,52	<i>R6</i>	0,59	<i>R6</i>	0,59	<i>R6</i>	0,59
<i>R7</i>	0,53	<i>R7</i>	0,58	<i>R7</i>	0,60	<i>R7</i>	0,60
<i>R8</i>	0,53	<i>R8</i>	0,59	<i>R8</i>	0,60	<i>R8</i>	0,62
<i>R9</i>	0,53	<i>R9</i>	0,57	<i>R9</i>	0,62	<i>R9</i>	0,63
<i>R10</i>	0,54	<i>R10</i>	0,61	<i>R10</i>	0,61	<i>R10</i>	0,63
<i>R11</i>	0,55	<i>R11</i>	0,58	<i>R11</i>	0,61	<i>R11</i>	0,62
<i>R12</i>	0,56	<i>R12</i>	0,60	<i>R12</i>	0,60	<i>R12</i>	0,63
<i>R13</i>	0,54	<i>R13</i>	0,61	<i>R13</i>	0,63	<i>R13</i>	0,63
<i>R14</i>	0,54	<i>R14</i>	0,60	<i>R14</i>	0,64	<i>R14</i>	0,63
<i>R15</i>	0,56	<i>R15</i>	0,59	<i>R15</i>	0,63	<i>R15</i>	0,65
<i>Média</i>	0,54	<i>Média</i>	0,59	<i>Média</i>	0,61	<i>Média</i>	0,62

ANEXO IV – Resultados obtidos da avaliação do modelo numérico com reabilitação com acústica variável do Anfiteatro AFD3.1.

1 Tempo de Reverberação (s)

<i>Frequência (Hz)</i>	<i>125</i>	<i>250</i>	<i>500</i>	<i>1000</i>	<i>2000</i>	<i>4000</i>	<i>Tr</i> <i>(500,1000,2000Hz)</i> <i>(s)</i>
<i>Auditório Vazio</i>	1,07	0,99	1,07	1,05	1,08	0,90	1,07
<i>Auditório 1/3 da Ocupação</i>	0,97	0,80	0,83	0,78	0,80	0,70	0,80
<i>Auditório 2/3 da Ocupação</i>	0,89	0,72	0,75	0,78	0,78	0,68	0,77
<i>Auditório 2/3 da Ocupação</i>	0,84	0,69	0,75	0,77	0,79	0,67	0,77

2 Nível Sonoro

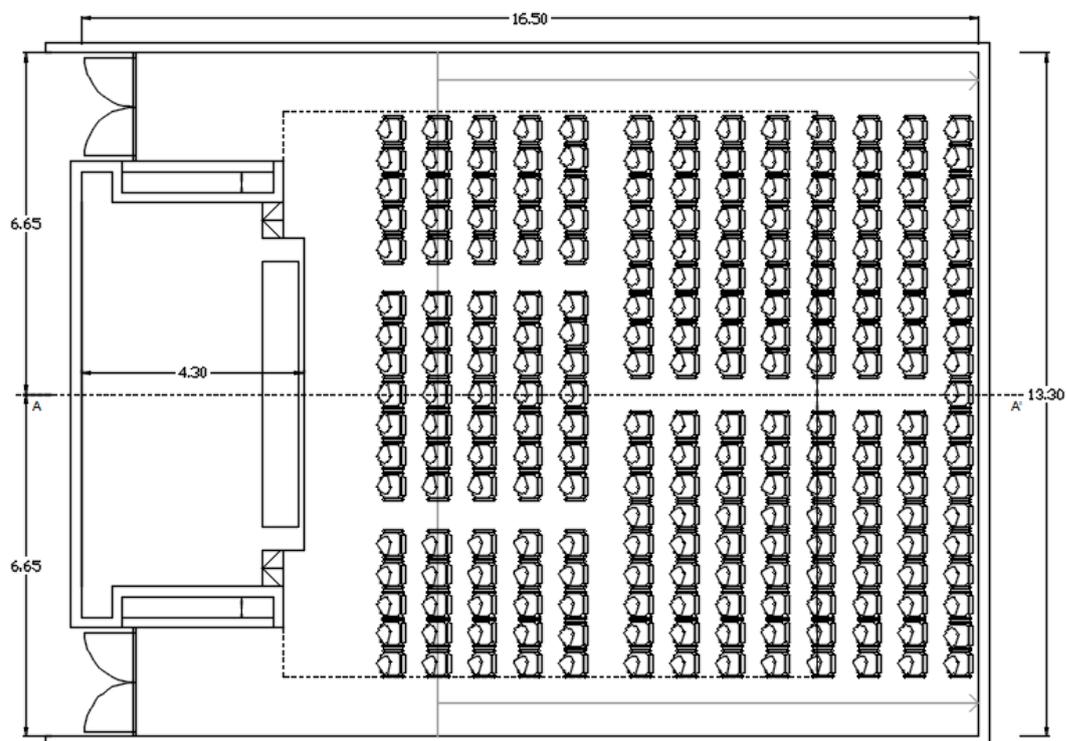
<i>Receptor</i>	<i>Auditório Vazio</i>	<i>Receptor</i>	<i>Auditório 1/3 da Ocupação</i>	<i>Receptor</i>	<i>Auditório 2/3 da Ocupação</i>	<i>Receptor</i>	<i>Auditório Lotação Total</i>
<i>R1</i>	104,96	<i>R1</i>	103,89	<i>R1</i>	103,64	<i>R1</i>	103,51
<i>R2</i>	105,74	<i>R2</i>	104,28	<i>R2</i>	104,14	<i>R2</i>	103,68
<i>R3</i>	105,37	<i>R3</i>	103,76	<i>R3</i>	103,89	<i>R3</i>	103,86
<i>R4</i>	104,48	<i>R4</i>	103,04	<i>R4</i>	101,81	<i>R4</i>	102,27
<i>R5</i>	104,66	<i>R5</i>	102,22	<i>R5</i>	101,80	<i>R5</i>	101,66
<i>R6</i>	104,55	<i>R6</i>	102,53	<i>R6</i>	102,08	<i>R6</i>	101,80
<i>R7</i>	103,42	<i>R7</i>	101,34	<i>R7</i>	100,65	<i>R7</i>	100,27
<i>R8</i>	103,45	<i>R8</i>	102,24	<i>R8</i>	99,86	<i>R8</i>	100,23
<i>R9</i>	103,35	<i>R9</i>	101,65	<i>R9</i>	101,15	<i>R9</i>	100,29
<i>R10</i>	101,30	<i>R10</i>	100,47	<i>R10</i>	99,98	<i>R10</i>	98,74
<i>R11</i>	102,59	<i>R11</i>	101,56	<i>R11</i>	99,89	<i>R11</i>	99,38
<i>R12</i>	101,59	<i>R12</i>	100,33	<i>R12</i>	98,80	<i>R12</i>	98,98
<i>R13</i>	100,47	<i>R13</i>	99,05	<i>R13</i>	98,53	<i>R13</i>	97,72
<i>R14</i>	100,75	<i>R14</i>	99,56	<i>R14</i>	99,58	<i>R14</i>	98,19
<i>R15</i>	100,28	<i>R15</i>	99,02	<i>R15</i>	98,60	<i>R15</i>	98,06

3 RASTI

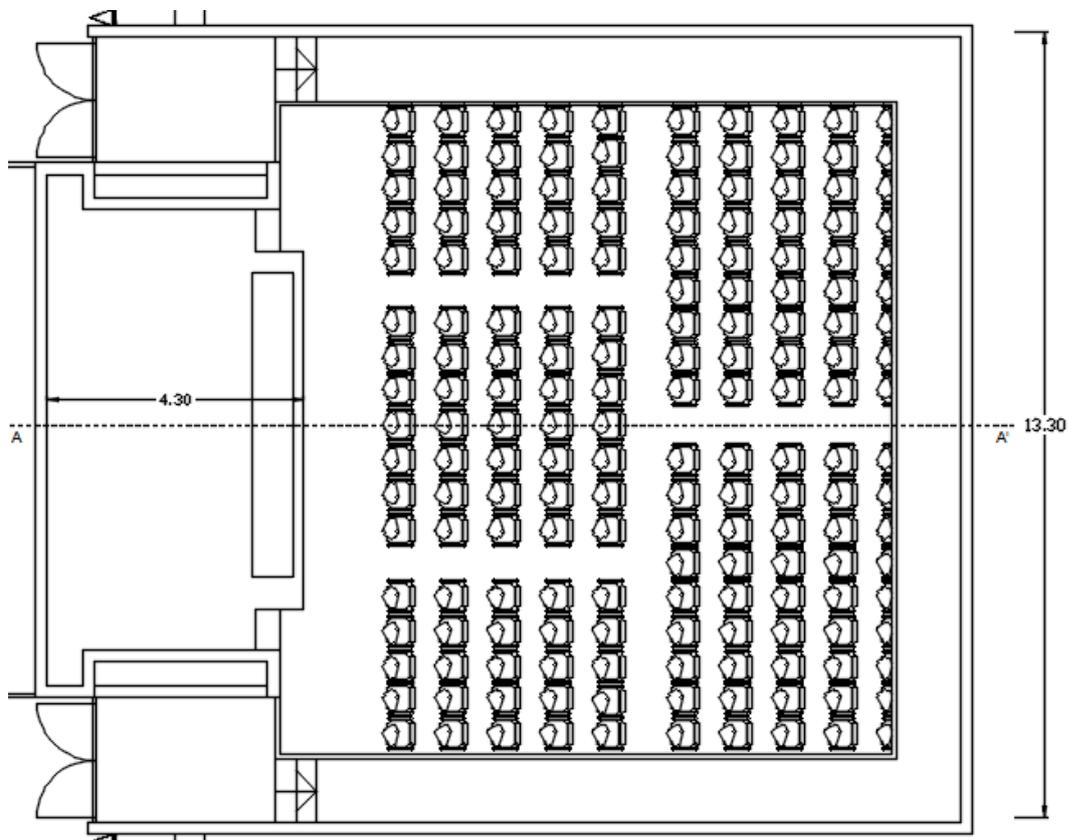
<i>Receptor</i>	<i>Auditório Vazio</i>	<i>Receptor</i>	<i>Auditório 1/3 da Ocupação</i>	<i>Receptor</i>	<i>Auditório 2/3 da Ocupação</i>	<i>Receptor</i>	<i>Auditório Lotação Total</i>
R1	0,54	R1	0,59	R1	0,59	R1	0,61
R2	0,54	R2	0,59	R2	0,61	R2	0,62
R3	0,55	R3	0,58	R3	0,60	R3	0,59
R4	0,54	R4	0,58	R4	0,59	R4	0,61
R5	0,52	R5	0,56	R5	0,59	R5	0,60
R6	0,52	R6	0,57	R6	0,59	R6	0,60
R7	0,53	R7	0,57	R7	0,59	R7	0,60
R8	0,53	R8	0,58	R8	0,58	R8	0,61
R9	0,53	R9	0,59	R9	0,61	R9	0,63
R10	0,54	R10	0,60	R10	0,63	R10	0,62
R11	0,55	R11	0,59	R11	0,61	R11	0,62
R12	0,56	R12	0,61	R12	0,61	R12	0,62
R13	0,54	R13	0,61	R13	0,61	R13	0,62
R14	0,54	R14	0,59	R14	0,62	R14	0,62
R15	0,56	R15	0,60	R15	0,64	R15	0,66
Média	0,54	Média	0,59	Média	0,60	Média	0,61

ANEXO V – Plantas e cortes do Auditório Laginha Serafim.

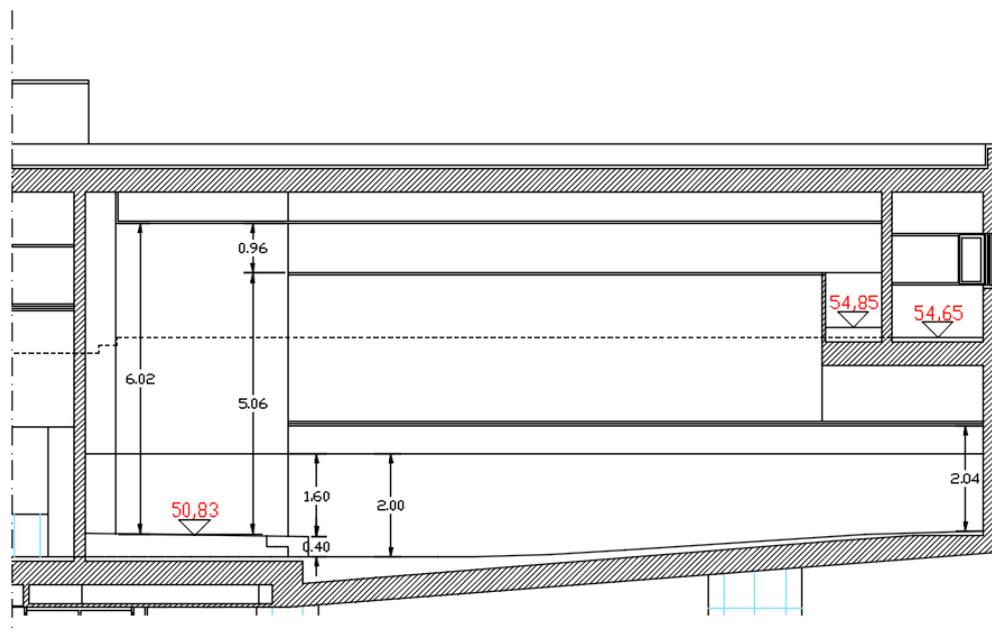
1 Planta do Primeiro Pavimento do Auditório Laginha Serafim



2 Planta do Segundo Pavimento do Auditório Laginha Serafim



2 Corte A-A'



ANEXO VI – Resultados obtidos da avaliação do modelo numérico do Auditório Laginha Serafim.

1 Tempo de Reverberação (s)

<i>Frequência (Hz)</i>	<i>125</i>	<i>250</i>	<i>500</i>	<i>1000</i>	<i>2000</i>	<i>4000</i>	<i>Tr (500,1000,2000Hz) (s)</i>
<i>Sem calibração</i>	2,17	2,19	2,26	2,30	1,90	1,52	2,15
<i>Com calibração</i>	2,38	2,30	2,36	2,40	1,97	1,47	2,24

2 Nível Sonoro

<i>Receptor</i>	<i>Sem calibração</i>	<i>Com calibração</i>	<i>Receptor</i>	<i>Sem calibração</i>	<i>Com calibração</i>
<i>R1</i>	102,78	102,98	<i>R9</i>	101,97	102,81
<i>R2</i>	101,99	102,24	<i>R10</i>	101,29	101,52
<i>R3</i>	101,86	101,87	<i>R11</i>	103,03	102,72
<i>R4</i>	101,33	101,50	<i>R12</i>	101,87	101,64
<i>R5</i>	101,07	101,33	<i>R13</i>	101,73	102,05
<i>R6</i>	103,83	104,08	<i>R14</i>	101,82	101,66
<i>R7</i>	102,92	103,39	<i>R15</i>	100,72	101,28
<i>R8</i>	102,85	103,03			

3 RASTI

<i>Receptor</i>	<i>Sem calibração</i>	<i>Com calibração</i>	<i>Receptor</i>	<i>Sem calibração</i>	<i>Com calibração</i>
<i>R1</i>	0,43	0,43	<i>R9</i>	0,44	0,44
<i>R2</i>	0,41	0,38	<i>R10</i>	0,44	0,43
<i>R3</i>	0,41	0,39	<i>R11</i>	0,43	0,44
<i>R4</i>	0,41	0,42	<i>R12</i>	0,40	0,40
<i>R5</i>	0,41	0,42	<i>R13</i>	0,42	0,41
<i>R6</i>	0,45	0,42	<i>R14</i>	0,43	0,40
<i>R7</i>	0,41	0,42	<i>R15</i>	0,40	0,41
<i>R8</i>	0,45	0,46	<i>Média</i>	0,42	0,42

ANEXO VII – Resultados obtidos da avaliação do modelo numérico com reabilitação inicial fixa do Auditório Laginha Serafim.

1 Tempo de Reverberação (s)

<i>Frequência (Hz)</i>	<i>125</i>	<i>250</i>	<i>500</i>	<i>1000</i>	<i>2000</i>	<i>4000</i>	<i>Tr (500,1000,2000Hz) (s)</i>
<i>Solução Fixa</i>	1,89	1,60	1,40	1,37	1,30	1,09	1,36

2 Nível Sonoro

<i>Receptor</i>	<i>Solução Fixa</i>	<i>Receptor</i>	<i>Solução Fixa</i>
<i>R1</i>	101,96	<i>R9</i>	100,21
<i>R2</i>	100,42	<i>R10</i>	98,10
<i>R3</i>	99,84	<i>R11</i>	101,94
<i>R4</i>	98,80	<i>R12</i>	100,52
<i>R5</i>	97,65	<i>R13</i>	99,81
<i>R6</i>	102,97	<i>R14</i>	98,96
<i>R7</i>	101,74	<i>R15</i>	96,94
<i>R8</i>	101,94		

3 RASTI

<i>Receptor</i>	<i>Solução Fixa</i>	<i>Receptor</i>	<i>Solução Fixa</i>
<i>R1</i>	0,49	<i>R9</i>	0,52
<i>R2</i>	0,47	<i>R10</i>	0,53
<i>R3</i>	0,47	<i>R11</i>	0,51
<i>R4</i>	0,50	<i>R12</i>	0,48
<i>R5</i>	0,50	<i>R13</i>	0,47
<i>R6</i>	0,49	<i>R14</i>	0,51
<i>R7</i>	0,49	<i>R15</i>	0,50
<i>R8</i>	0,54	<i>Média</i>	0,50

ANEXO VIII – Resultados obtidos da avaliação do modelo numérico com reabilitação com acústica variável do Auditório Laginha Serafim.

1 Tempo de Reverberação (s)

<i>Frequência (Hz)</i>	<i>125</i>	<i>250</i>	<i>500</i>	<i>1000</i>	<i>2000</i>	<i>4000</i>	<i>Tr</i> <i>(500,1000,2000Hz)</i> <i>(s)</i>
<i>"Solução 1" - (CFRF3/8-16/32)</i>	1,85	1,33	1,22	1,29	1,25	1,07	1,25
<i>"Solução 2" - 9CFmicro)</i>	1,82	1,36	1,23	1,19	1,22	1,01	1,21

2 Nível Sonoro

<i>Receptor</i>	<i>"Solução 1"</i>	<i>"Solução 2"</i>	<i>Receptor</i>	<i>"Solução 1"</i>	<i>"Solução 2"</i>
<i>R1</i>	101,91	101,55	<i>R9</i>	99,06	97,84
<i>R2</i>	99,48	99,57	<i>R10</i>	96,39	95,97
<i>R3</i>	98,42	98,30	<i>R11</i>	101,62	101,50
<i>R4</i>	97,63	97,06	<i>R12</i>	99,54	99,65
<i>R5</i>	95,52	94,89	<i>R13</i>	98,75	98,99
<i>R6</i>	102,70	102,38	<i>R14</i>	97,90	97,19
<i>R7</i>	100,89	100,98	<i>R15</i>	96,26	94,63
<i>R8</i>	100,28	100,22			

3 RASTI

<i>Receptor</i>	<i>"Solução 1"</i>	<i>"Solução 2"</i>	<i>Receptor</i>	<i>"Solução 1"</i>	<i>"Solução 2"</i>
<i>R1</i>	0,51	0,51	<i>R9</i>	0,53	0,52
<i>R2</i>	0,48	0,49	<i>R10</i>	0,54	0,56
<i>R3</i>	0,50	0,50	<i>R11</i>	0,51	0,52
<i>R4</i>	0,51	0,52	<i>R12</i>	0,48	0,49
<i>R5</i>	0,53	0,55	<i>R13</i>	0,51	0,50
<i>R6</i>	0,51	0,50	<i>R14</i>	0,52	0,51
<i>R7</i>	0,49	0,52	<i>R15</i>	0,56	0,57
<i>R8</i>	0,55	0,56	<i>Média</i>	0,51	0,52