

ANÁLISE ACÚSTICA NA REABILITAÇÃO DO CINETEATRO DE ESMORIZ

RUI FILIPE MENDES DA SILVA

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

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JUNHO DE 2020

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2019/2020

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2019/2020 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2020.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

*O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência
em se chegar a um objetivo.
Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos,
no mínimo fará coisas admiráveis*

José de Alencar

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação representa o culminar destes últimos cinco anos que me fizeram crescer não só no ponto de vista do conhecimento, mas também como pessoa na sociedade. Anos de aprendizagens, novas experiências, de persistência, dedicação, de resiliência nos períodos mais difíceis e de gratidão pelos bons momentos vividos. Todos estes momentos foram partilhados com pessoas especiais e incríveis às quais eu quero, aqui, demonstrar o meu profundo agradecimento, em especial:

Ao meu orientador Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho por toda a sua disponibilidade e prontidão durante todo este semestre marcado pela pandemia de *Covid-19*, que complicou aquilo que foi o acompanhamento presencial do trabalho realizado, mas que não impediu que o professor estivesse sempre presente, através de outros meios, quando necessitei da sua ajuda.

Ao Engenheiro Eduardo Costa, que para além de toda a disponibilidade demonstrada na realização das medições acústicas do cineteatro de Esmoriz, sempre manifestou um grande espírito de simpatia e amizade para comigo.

A todos os meus amigos, quer sejam da faculdade ou da música, que de diversas formas me ajudaram direta ou indiretamente ao longo destes cinco anos. Agradecer pela amizade, pelas maratonas de estudo pela madrugada fora, pelas novas experiências, pelos momentos de companheirismo, convívio e pelos laços criados. Aos meus companheiros do ramo da música por todos os bons momentos e loucuras vividas nos ensaios, em cima do palco e na “estrada”.

Ao meu pai que, desde de que me lembro de ser pessoa, sempre me “puxou” para o ramo da *Construção* e me permitiu ganhar o “bichinho” pela Engenharia Civil. Agradecer por todos os conhecimentos que me transmitiu pela sua vasta experiência na área e por aquele dia, há muitos anos atrás, em que me ensinou a trabalhar com um teodolito.

À minha mãe que, durante estes cinco anos, foi o meu grande pilar e suporte em todos os momentos de desânimo e de dificuldade e me conseguiu sempre motivar, incentivar e me fazer perceber que eu seria capaz de concretizar os meus objetivos. Agradecer por toda a educação e valores que me transmitiu, que me permitiram ser o homem que sou hoje.

Ao meu irmão que me aturou nos momentos mais complicados e nos dias em que tinha menos paciência para as suas brincadeiras. Agradecer pelos momentos vividos desde a infância até aos dias de hoje e que me fizeram perceber que não tenho apenas um irmão, mas também um grande amigo.

À minha namorada que esteve sempre presente nos bons e maus momentos, que teve uma enorme paciência para me aturar nos períodos difíceis e que nunca, em algum momento, me deixou “cair”. Agradecer por todo o apoio, por me fazer acreditar em mim mesmo, por todos os concelhos e pelas tentativas de me ajudar nos trabalhos de engenharia, sendo ela Enfermeira.

Por fim, agradeço a toda a minha família (avós, tios e primos) que me apoiaram incondicionalmente neste percurso e que de forma direta ou indireta contribuíram para que conseguisse alcançar este meu objetivo e concretizasse o sonho de ser Engenheiro Civil.

RESUMO

Os locais destinados à prática de atividades culturais como música, cinema, teatro e conferências, devem ser alvos de estudos acústicos exigentes para permitir o bom comportamento destes às práticas aí existentes, bem como, o consequente conforto acústico dos utilizadores do espaço para que estes desfrutem do espetáculo/evento na sua plenitude.

O objetivo desta dissertação passa pelo estudo acústico do cineteatro de Esmoriz e pela análise de um possível projeto acústico adequado ao espaço em causa.

O cineteatro em questão já existe fisicamente desde meados dos anos 50 e está atualmente a ser alvo de obras de reabilitação tanto no espaço do auditório como no espaço envolvente. Posto isto, o estudo e projeto acústico realizado para este local será condicionado por alguns elementos já existentes e pelo volume e forma do espaço.

Sendo este um local multicultural, dá lugar a vários tipos de atividades, sejam elas de cariz musical, teatral ou cinematográfico. Torna-se, então, necessário realizar um estudo e consequente projeto de acústica variável, pois, o tempo de reverberação ótimo para objetivar um melhor conforto acústico por parte dos utilizadores é diferente para os diferentes tipos de atividades. Para espetáculos musicais pretendem-se valores de tempo de reverberação mais altos do que espetáculos relacionados, por exemplo, com o teatro ou cinema, para uma melhor claridade e definição sonora, respetivamente.

Para a concretização de um espaço com um comportamento acústico adequado às diferentes atividades culturais são estudados vários tipos de materiais e sistemas que existem à disposição no mercado para a execução dos trabalhos de correção acústica, que serão aprofundados no decorrer desta dissertação.

Aliado à correção acústica da sala, é importante também estudar o isolamento sonoro do espaço em questão, em relação à envolvente, para que, ruídos produzidos no exterior da sala não causem interferência no comportamento acústico desta. Assim sendo, também são estudados materiais e sistemas que melhor possam combater os problemas provenientes de ruídos aéreos ou de percussão exteriores à sala.

Para a realização do estudo acústico referido é feita, primeiramente, uma descrição genérica de alguns conceitos teóricos abrangentes na área da acústica. São tidos em conta os conceitos de tempo de reverberação, absorção sonora, isolamento sonoro a ruídos aéreos e de percussão enquadrando-os à luz da legislação em vigor, dada pelo *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE)*, primando sempre pelos valores ideais dos parâmetros acústicos para um consequente comportamento acústico mais favorável.

Foi realizado um levantamento geométrico do espaço e a sua respetiva caracterização em função do tempo de reverberação aí existente. Foram realizadas medições do tempo de reverberação em quatro pontos distintos da sala, obtendo-se valores entre 1,7 e 2 segundos.

Foram realizados estudos de correção acústica do espaço e apresentam-se diferentes soluções que permitem tornar esta sala num bom lugar para espetáculos/eventos multiculturais, prezando sempre pelo maior conforto acústico por parte dos utilizadores. Através do tratamento acústico da sala conseguiram-se obter valores ideais de TR para as atividades de maior importância no futuro cartaz cultural do auditório com valores médios entre os 0,9 e os 1,1 segundos.

PALAVRAS CHAVE: conforto acústico; correção acústica; isolamento sonoro; acústica variável; absorção sonora; tempo de reverberação.

ABSTRACT

Places intended for the practice of cultural activities such as music, cinema, theater or conferences, must be the target of demanding acoustic studies to allow their good behavior to the practices that exist there, as well as the consequent acoustic comfort of the users of the space so that they fully enjoy the show/event.

The objective of this dissertation is the acoustic study of the theater of Esmoriz and the analysis of a possible acoustic project suitable to that space.

The theater already exists physically since the mid 1950s and is currently undergoing rehabilitation works both in the auditorium and in the surrounding spaces. The study and acoustic design carried out for this location is conditioned by some existing elements and by the volume and shape of the space.

This being a multifunction place, it gives rise to various types of activities, like music, theater or cinema. It is then necessary to carry out a study and consequent design of variable acoustics, since the optimal reverberation time to aim for better acoustic comfort on the part of users is different for different types of activities. Higher reverb time values are intended for musical shows than for example, to theater or cinema, for better clarity and definition, respectively.

For the realization of a space with an acoustic behavior suitable for different activities, various types of materials and systems available on the market for the execution of acoustic correction works, are studied, which are further developed during this dissertation.

In addition to the acoustic correction of the room, it is also important to study the sound insulation of the space in question, in relation to the surroundings, so that noises produced outside the room do not interfere with the acoustic behavior of the room. Therefore, materials and systems that can better combat problems arising from airborne or structure borne noise outside the room, are also studied.

To carry out the acoustic study, a generic description of some broad theoretical concepts in the area of acoustics is presented first. The concepts of reverberation time, sound absorption, sound insulation are taken into account, framing them in the light of the legislation in force, given by the Regulation of Building Acoustic Requirements (RRAE in Portuguese), always emphasizing the ideal values of acoustic parameters for a consequent more favorable acoustic behavior.

A geometric survey of the space and its respective characterization according to the reverberation time was carried out. Reverberation time measurements were made at four different points in the room, obtaining average values between 1,6 and 2,0 seconds.

Studies were made on the acoustic correction of the space and introducing different solutions that could make this room a suitable place for multitype shows/events, always valuing the greatest acoustic comfort on the part of the users. Through the acoustic treatment of the room, ideal TR values were obtained for the most important activities in the future cultural poster of the auditorium with average values between 0.9 and 1.1 seconds.

KEY WORDS: acoustic comfort; acoustic correction; sound insulation; variable acoustics; sound absorption, reverberation time.

Índice Geral

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1.INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS	1
1.2. ESTRUTURA	2
2.CONCEITOS E DEFINIÇÕES	3
2.1. PRINCÍPIOS BÁSICOS	3
2.1.1. SOM E RUÍDO.....	3
2.1.2. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA	4
2.1.3. NÍVEIS SONOROS	5
2.1.4. DIRECIONALIDADE	6
2.1.5. ANÁLISE EM FREQUÊNCIA	6
2.1.5.1. Definições	6
2.1.5.2. Curvas de ponderação	7
2.1.5.3. Comprimento de onda	8
2.2. ABSORÇÃO SONORA	9
2.2.1. DEFINIÇÃO	9
2.2.2. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS	9
2.2.2.1. Introdução	9
2.2.2.2. Materiais porosos e fibrosos.....	10
2.2.2.3. Ressonadores.....	10
2.2.3. ABSORÇÃO SONORA EM AUDITÓRIOS	11
2.2.4. CAMPO DIRETO E CAMPO REVERBERADO	13
2.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	13
2.3.1. DEFINIÇÃO	13
2.3.2. FÓRMULAS DE PREVISÃO.....	14
2.3.2.1. Fórmula de Sabine	14
2.3.2.2. Fórmula de Eyring	15
2.3.2.3. Fórmula de Millington-Sette.....	15
2.3.3. VALORES IDEAIS	15
2.4. ISOLAMENTO SONORO	16
2.4.1. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS	16
2.4.1.1. Introdução	16
2.4.1.2. Elementos simples.....	17
2.4.1.3. Elementos duplos	18
2.4.2. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO	18

2.4.3. RUÍDOS DE EQUIPAMENTOS	19
2.5. ACÚSTICA ARQUITETÓNICA	20
2.5.1. REFLEXÕES.....	20
2.5.1.2. Reflexões e o ouvido humano	21
2.5.1.3. Superfícies de reflexão	21
2.5.1.4. Ecos	23
2.5.2. DIFUSÃO	24
2.5.3. ACÚSTICA VARIÁVEL	25
2.5.3.1. Introdução	25
2.5.3.2. Variação no volume	26
2.5.3.3. Variação na absorção.....	27
2.5.4. PARÂMETROS ACÚSTICOS	28
2.5.4.1. Parâmetros objetivos	28
2.5.4.2. Parâmetros subjetivos	30
3. ESTADO DA ARTE	33
3.1. ACÚSTICA DE AUDITÓRIOS – ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	33
3.2. EXIGÊNCIA FUNCIONAIS DE AUDITÓRIOS	38
3.2.1. REGRAS GERAIS	38
3.2.2. AUDITÓRIOS PARA PALAVRA	41
3.2.3. AUDITÓRIOS PARA MÚSICA	42
3.2.4. AUDITÓRIOS MULTIUSOS	43
3.3. LEGISLAÇÃO PORTUGUESA.....	44
3.3.1. INTRODUÇÃO	44
3.3.2. ISOLAMENTO A RUÍDOS AÉREOS.....	45
3.3.3. RUÍDOS CAUSADOS POR EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES TÉCNICAS	45
3.3.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	46
4. CINETEATRO DE ESMORIZ.....	47
4.1. PASSADO HISTÓRICO.....	47
4.2. CARACTERIZAÇÃO	48
5. MEDIÇÕES ACÚSTICAS	53
5.1. METODOLOGIA.....	53
5.2. RESULTADOS.....	54
6. PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO NO PROJETO	61
6.1. CORREÇÃO ACÚSTICA	61
6.1.1. ABORDAGEM INICIAL	61
6.1.2. SUPERFÍCIES DE REFLEXÃO	62
6.1.3. REVESTIMENTO DO PAVIMENTO	68
6.1.4. ACESSOS AO AUDITÓRIO	69
6.1.5. EFEITO DA ABSORÇÃO SONORA DAS SUPERFÍCIES DE REFLEXÃO/ PAVIMENTO E PORTAS.....	72

6.1.6. IDENTIFICAÇÃO E RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS.....	77
6.1.7. PROJETO DE ACÚSTICA VARIÁVEL	80
6.2. ISOLAMENTO SONORO.....	92
6.2.1. IDENTIFICAÇÃO DE PROBLEMAS.....	92
6.2.2. RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS.....	94
6.2.2.1. Ruídos do sistema de ventilação (AVAC)	94
6.2.2.2. Ruídos dos foyers envolventes ao auditório	106
6.2.2.3. Ruídos das instalações sanitárias e camarins na zona do palco.....	110
7.CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	113
7.1. CONCLUSÃO	113
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Propagação do som em meio elástico (Adaptado de [2]).	3
Figura 2.2 - Pressão sonora e pressão atmosférica (Adaptado de [2]).	4
Figura 2.3 - Relação entre potência (W), pressão (p) e intensidade (I) (Adaptado de [2]).	5
Figura 2.4 - Gama de frequências em instrumentos musicais (a preto, as frequências fundamentais e a cinzento os harmónicos de cada instrumento) (Adaptado de [3]).	6
Figura 2.5 - Gama de frequências audíveis pelo ouvido humano [4].	7
Figura 2.6 - Efeito do comprimento de onda face a obstáculos (Adaptado de [2]).	8
Figura 2.7 - Mecanismo da absorção sonora [5].	9
Figura 2.8 - Comportamento dos materiais absorventes sonoros, em função da frequência [6].	10
Figura 2.9 - Coeficientes de absorção sonora dos assentos da plateia, ocupados e desocupados, em função do “grau de estofamento” (Adaptado de [2]).	12
Figura 2.10 - Variação do nível de pressão sonora segundo a lei do quadrado inverso em função da frequência, devido aos efeitos dos assentos da plateia (Adaptado de [8]).	12
Figura 2.11 - Tempo de reverberação (valor obtido por extrapolação do declive da reta de melhor ajuste para um decaimento de 30 dB do nível sonoro) (Adaptado de [2]).	14
Figura 2.12 - Tempo de reverberação ideal nas várias frequências para música orquestral e para palavra (Adaptado de [2]).	16
Figura 2.13 - Curvas de incomodidade (Noise Criterion) (Adaptado de [13]).	20
Figura 2.14 - Reflexões sonoras num auditório [2].	20
Figura 2.15 - Reflectograma de uma sala de espetáculos (ITDG – initial time delay gap) (Adaptado de [2]).	21
Figura 2.16 - Reflexões laterais a partir de superfícies refletoras colocadas perto do ouvinte [2].	21
Figura 2.17 - Reflexão sonora em superfícies convexas, planas e côncavas (Adaptado de [2]).	22
Figura 2.18 - Posição ideal de colocação de uma superfície em relação à fonte (F) e ao recetor (R) [2].	22
Figura 2.19 - Meia planta com elipses onde devem ser colocadas tangencialmente as superfícies de reflexão em função da distância ao palco correspondente a um atraso da reflexão de 50 ms (Adaptado de [2]).	23
Figura 2.20 - Exemplo de refletograma com eco (Adaptado de [2]).	23
Figura 2.21 - Ecos produzidos nas paredes traseiras de um auditório. Situação a) - ecos enviados para o palco. Situação b) - solução de inclinar a parede (eliminação de ecos indesejados). Situação c) - excesso de inclinação da parede (ecos para a plateia) [2].	24
Figura 2.22 - Ecos repetidos (flutter echoes) entre duas paredes paralelas (Adaptado de [2]).	24
Figura 2.23 - Exemplo de um difusor quadrático [15].	25
Figura 2.24 - Exemplo de um Art Diffusor (à esquerda) [16] e a difusão característica de superfícies onduladas (à direita) (Adaptado de [2]).	25
Figura 2.25 - Diferentes níveis de teto no Milton Keynes Theatre (Inglaterra) [2].	26
Figura 2.26 - Painéis articulados com superfícies absorventes ou refletoras [2].	27
Figura 2.27 - a) superfícies de reflexão; b) superfícies de dispersão; c) superfícies absorventes; d) superfícies de alta difusão [2].	28
Figura 3.1 - Teatro de Dioniso, em Atenas [28].	33
Figura 3.2 - Exemplo de um teatro clássico grego (Anciente Theater at Epidaurus) [27].	34
Figura 3.3 - A) Arquibancada íngreme, com o som direto e refletido a chegar a toda a plateia; B) Arquibancada pouco inclinada, com problemas na receção de som direto e refletido [30].	35
Figura 3.4 - Coliseu de Roma [32].	35
Figura 3.5 - Teatro renascentista [33].	36
Figura 3.6 - Hannover Square Room (Londres) [34].	37
Figura 3.7 - Distribuição de reflexões laterais pela sala em forma de leque (Azul – poucas reflexões laterais; Laranja – muitas reflexões laterais) [37].	39
Figura 3.8 - Distribuição de reflexões laterais pela sala em forma de leque invertido (Azul - poucas reflexões; Laranja - muitas reflexões) [37].	39
Figura 3.9 - Distribuição de reflexões laterais pela sala em forma de hexágono alargado (Azul - poucas reflexões; Laranja - muitas reflexões) [37].	40

Figura 3.10 - Esquema representativo da colocação dos assentos de forma alternada entre os patamares [41].	41
Figura 4.1 - Cineteatro Esmoriztur em Esmoriz [45].	47
Figura 4.2 – Planta do piso 0 do cineteatro Esmoriztur na situação futura.	48
Figura 4.3 - Entrada Norte do edifício, piso 0 (zona de cargas e descargas).	49
Figura 4.4 – Cineteatro de Esmoriz (situação futura), com instalações sanitárias localizadas em espaços adjacentes ao palco, piso 0.	49
Figura 4.5 – Cineteatro de Esmoriz - planta do espaço do auditório (situação futura, piso 0).	50
Figura 4.6 – Cineteatro de Esmoriz - corte transversal do espaço do auditório (situação futura, piso 0).	50
Figura 4.7 - Interior do auditório do cineteatro de Esmoriz (foto tirada a partir do palco). [Foto de autor]	51
Figura 4.8 - Interior do auditório do cineteatro de Esmoriz (foto tirada a partir do topo do auditório). [Foto de autor]	51
Figura 5.1 - Equipamento utilizado na medição do tempo de reverberação no auditório do cineteatro de Esmoriz (à esquerda, o sonómetro B&K2260 e à direita a fonte sonora B&K4224) [Fotos de Autor].	53
Figura 5.2 - Pontos do auditório do cineteatro de Esmoriz onde foi medido o tempo de reverberação [Esquema do autor].	54
Figura 5.3 - Valores do tempo de reverberação médio (500/1k/2k Hz) nos quatro pontos de medição no auditório do cineteatro de Esmoriz (situação atual, sem cadeiras).	56
Figura 5.4 - Cadeira escolhida para colocar no auditório do cineteatro de Esmoriz (modelo NUS da marca EuroSeating) [47].	57
Figura 6.1 - Percentagens de utilização do auditório do cineteatro de Esmoriz para cada tipo de atividade de acordo com o Dono de Obra.	62
Figura 6.2 - Caminho percorrido pelo som direto até às várias filas de assentos da plateia no auditório do cineteatro de Esmoriz.	62
Figura 6.3 - Dimensionamento dos painéis refletores em gesso cartonado no teto e as respetivas reflexões provocadas por cada um (vermelho: painéis de gesso cartonado; verde e azul: reflexões provocadas pelas superfícies refletoras).	63
Figura 6.4 - Alçado do auditório do cineteatro de Esmoriz com a respetiva disposição dos painéis refletores de teto.	64
Figura 6.5 - Planta do auditório do cineteatro de Esmoriz com a respetiva disposição dos painéis refletores de teto.	64
Figura 6.6 - Dimensionamento dos painéis refletores laterais em madeira envernizada e as respetivas reflexões provocadas por cada um (vermelho: painéis de gesso cartonado; verde e azul: reflexões provocadas pelas superfícies refletoras).	65
Figura 6.7 - Disposição dos elementos de reflexão lateral no auditório do cineteatro, em alçado.	66
Figura 6.8 - Disposição dos elementos de reflexão lateral no auditório do cineteatro, em planta.	66
Figura 6.9 - Distâncias percorridas pelo som direto e pelo som refletido proveniente dos painéis refletores do teto em vários pontos do auditório.	67
Figura 6.10 - À esquerda, o painel absorvente Silentium BT60 Bruto [48] e à direita, o painel difusor em madeira maciça (pinho) envernizada da Ideatec [49].	68
Figura 6.11 - Vista traseira do auditório com a indicação das superfícies a serem revestidas com painéis absorventes e painéis difusores.	68
Figura 6.12 - Exemplo de uma carpeta fina de 6 mm a ser colocada como revestimento do pavimento do auditório do cineteatro [50].	69
Figura 6.13 - Exemplo de paredes e tetos com acabamento estanhado Sonacoustic [52].	70
Figura 6.14 - Coeficientes de absorção do acabamento estanhado Sonacoustic de 25 mm, com a existência de uma caixa de ar de 125 mm [52].	70
Figura 6.15 – Proposta da antecâmara de entrada para o auditório do cineteatro, em planta.	70
Figura 6.16 - Corte horizontal de uma porta Silentium PM 35R, da marca Silêncio [53].	71
Figura 6.17 - Locais na zona do palco onde serão colocadas portas Silentium PM43R (a azul).	71

Figura 6.18 - Corte horizontal de uma porta Silentium PM 43R, da marca Silêncio [54].	72
Figura 6.19 - Corte vertical do sistema de absorção sonora de baixas frequências com painéis de contraplacado de 3 mm de espessura associados a uma caixa de ar de 150 mm preenchida com 75 mm de lã mineral.	78
Figura 6.20 - Sistema constituído por painéis de madeira maciça envernizada de 20 mm e contraplacado de 3 mm associado a uma caixa de ar de 150 mm preenchida com 75 mm de lã mineral, com os primeiros fechados e a serem as superfícies de contacto das ondas sonoras recebidas.	81
Figura 6.21 - Sistema constituído por painéis de madeira maciça envernizada de 20 mm e contraplacado de 3 mm associado a uma caixa de ar de 150 mm preenchida com 75 mm de lã mineral, com os primeiros abertos e a serem as superfícies de contraplacado a receber as ondas sonoras.	81
Figura 6.22 - Corte construtivo vertical do sistema composto por painéis de madeira de 20 mm e de contraplacado de 3 mm associado a uma caixa de ar de 100 mm preenchida com 50 mm de lã mineral, colocados nas paredes laterais que delimitam a bancada superior.	82
Figura 6.23 - Corte construtivo horizontal do sistema composto por painéis de madeira de 20mm e de contraplacado de 3 mm associado a uma caixa de ar de 100 mm preenchida com 50 mm de lã mineral, colocados nas paredes laterais que delimitam a bancada superior (situação de painéis de madeira fechados).	82
Figura 6.24 - Planta do auditório do cineteatro de Esmoriz com a representação de quatro cortes verticais.	88
Figura 6.25 - Corte AA' do auditório do cineteatro de Esmoriz.	88
Figura 6.26 - Corte BB' do auditório do cineteatro de Esmoriz.	89
Figura 6.27 - Corte CC' do auditório do cineteatro de Esmoriz.	89
Figura 6.28 - Corte DD' do auditório do cineteatro de Esmoriz.	90
Figura 6.29 - Vista superior em 3D do auditório do cineteatro de Esmoriz onde é possível ver o teto refletor em gesso cartonado.	90
Figura 6.30 - Vista superior em 3D em que é possível ver o interior do auditório e os respetivos materiais acústicos.	91
Figura 6.31 - Vista frontal superior em 3D em que é possível ver a zona do palco e a porta de emergência a meio da parede lateral.	91
Figura 6.32 - Unidade rooftop de alta eficiência (Bomba de Calor) da marca Lennox, modelo Rooftop Heat Pump Unit Energy (EO14 AH 065) [56].	92
Figura 6.33 - Localização na cobertura das unidades de tratamento de ar e da unidade rooftop de bomba de calor (planta).	93
Figura 6.34 - Localização das unidades de tratamento de ar e da unidade rooftop de bomba de calor na cobertura (alçado).	93
Figura 6.35 - Exemplo de uma laje de inércia utilizada para eliminar vibrações dos elementos construtivos onde são instalados equipamentos ruidosos [1].	94
Figura 6.36 - Dimensões da unidade rooftop a ser colocada na cobertura do edifício do cineteatro de Esmoriz [56].	95
Figura 6.37 - Apoios anti-vibráteis da marca Christie & Grey Limited a colocar sob a laje de inércia [57].	95
Figura 6.38 - Ábaco para obtenção da deflexão estática em função da frequência de operação da unidade rooftop colocada na cobertura do edifício do cineteatro de Esmoriz [1].	96
Figura 6.39 - Ábacos dos apoios anti-vibráteis de borracha da marca Christie & Grey Limited [57].	96
Figura 6.40 - Ábaco para obtenção da deflexão estática em função da frequência de operação da unidade de tratamento de ar colocada na cobertura do edifício do cineteatro de Esmoriz [1].	97
Figura 6.41 - Ábacos dos apoios anti-vibráteis de borracha da marca Christie & Grey Limited [57].	98
Figura 6.42 - Barreira acústicas Alphafon da marca Alpha Acoustiki a colocar na zona dos equipamentos de ventilação [58].	99
Figura 6.43 - Dados submetidos no software desenvolvido pela empresa Trox Technik, para o dimensionamento de um atenuador sonoro para o processo de insuflação [60].	102
Figura 6.44 - Perdas sonoras, em dB, introduzidas pelo atenuador acústico colocado à saída do ventilador de insuflação da unidade rooftop [60].	103
Figura 6.45 – Imagem (à esquerda) e esquema representativo (à direita) do atenuador XSA100-79-7-PF dimensionado para diminuir os níveis de pressão sonora provocados pelo processo de insuflação de ar para o auditório [60].	103

Figura 6.46 - Dados submetidos no software desenvolvido pela empresa Trox Technik, para o dimensionamento de um atenuador sonoro para o processo de extração de ar [60].	104
Figura 6.47 - Perdas sonoras, em dB, introduzidas pelo atenuador acústico colocado à saída do ventilador de extração da unidade rooftop [60].	104
Figura 6.48 - Esquema representativo do atenuador XSA100-67-9-PF dimensionado para diminuir os níveis de pressão sonora provocados pelo processo de extração de ar do auditório [60].	105
Figura 6.49 - Avaliação da incomodidade causada pelos ruídos de ventilação no auditório recorrendo a curvas NC.	106
Figura 6.50 - Corte vertical do elemento construtivo pensado para as paredes de separação entre os foyers e o auditório.	107
Figura 6.51 - Comportamento teórico do elemento construtivo constituído por uma parede de alvenaria de 30 cm, uma caixa de ar de 15 cm e uma parede de gesso cartonado de 1,5cm, em função das bandas de frequência de oitava.	108
Figura 6.52 - Dispositivo resiliente da marca Rondo usado para unir os dois paramentos do elemento construtivo composto por uma parede de alvenaria e por uma parede de gesso cartonado. [61].	109
Figura 6.53 - Aglomerado de cortiça a ser utilizado como material resiliente no pavimento da zona envolvente do auditório [62].	110
Figura 6.54 - Abraçadeiras resilientes para fixação de tubagens hidráulicas de modo a eliminar ruídos por vibração [63].	110

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Valores numéricos das ponderações da curva A na gama audível [1].	8
Quadro 2.2 - Absorção sonora do ar (m^{-1}) em função da humidade relativa (HR) [1].	15
Quadro 2.3 - Valores ideais de tempo de reverberação em função do tipo de utilização da sala [1].	16
Quadro 3.1 - Área e volume recomendados por cada assento da plateia [40].	41
Quadro 3.2 - Valores recomendados de tempo de reverberação para cada estilo musical [1].	43
Quadro 3.3 - Valores recomendados da Claridade (C_{80}) para cada estilo musical [1].	43
Quadro 5.1 - Resultado das medições do tempo de reverberação no auditório do cineteatro de Esmoriz (situação atual, sem cadeiras) em segundos, nas diferentes bandas de frequência de 1/3 de oitava.	55
Quadro 5.2 - Valores do tempo de reverberação em função das frequências por banda de 1/1 oitava no auditório do cineteatro de Esmoriz (situação atual, sem cadeiras).	55
Quadro 5.3 - Coeficientes de absorção sonora, em função da frequência, de uma parede de alvenaria em tijolo rebocada [46].	57
Quadro 5.4 - Coeficientes de absorção sonora da cadeira NUS ocupada, por banda de frequência de 1/1 oitava. [47].	57
Quadro 6.1 - Cálculo da diferença das distâncias percorridas entre o som direta e o som refletido proveniente dos painéis refletores do teto.	67
Quadro 6.2 - Coeficientes de absorção sonora (α) do painel absorvente Silentium BT60 Bruto [48] e do painel difusor em madeira maciça (pinho) envernizada da Ideatec [49].	68
Quadro 6.3 - Coeficientes de absorção sonora (α) de uma carpete fina de 6 mm colada sobre o betão [51].	69
Quadro 6.4 - Coeficientes de absorção sonora (α) de uma porta Silentium PM 35R [53].	71
Quadro 6.5 - Coeficientes de absorção sonora (α) de uma porta Silentium PM 43R [54].	72
Quadro 6.6 - Coeficientes de absorção sonora de placas de gesso cartonado de 3 cm e de madeira maciça de pinho envernizada de 2 cm [55].	72
Quadro 6.7 - Valores de absorção sonora equivalente (A) por bandas de frequência de 1/1 oitava, referente ao auditório vazio (à exceção de cadeiras e condutas AVAC) e fechado.	73
Quadro 6.8 - Valores da absorção sonora equivalente do teto refletor em gesso cartonado por bandas de frequência de 1/1 oitava.	73
Quadro 6.9 - Valores da absorção sonora equivalente das superfícies refletoras laterais em madeira de pinho envernizada por bandas de frequência de 1/1 oitava.	74
Quadro 6.10 - Valores da absorção sonora equivalente do pavimento revestido com carpete fina de 6 mm colada sobre o betão por bandas de frequência de 1/1 oitava.	74
Quadro 6.11 - Valores da absorção sonora equivalente das quatro portas Silentium PM 35R, colocadas no topo do auditório, por bandas de frequência de 1/1 oitava.	75
Quadro 6.12 - Valores da absorção sonora equivalente das seis portas Silentium PM 43R, colocadas na zona do palco na antecâmara de acesso à zona de cargas e descargas, de acesso aos camarins e nas duas saídas laterais do auditório, por bandas de frequência de 1/1 oitava.	75
Quadro 6.13 - Valores da absorção sonora equivalente de painéis absorventes Silentium BT60 BRUTO colocados em elementos verticais na parte traseira do auditório, por bandas de frequência de 1/1 oitava.	76
Quadro 6.14 - Valores da absorção sonora equivalente de painéis difusores em madeira maciça de pinho envernizada da Ideatec colocados em elementos verticais na parte traseira do auditório, por bandas de frequência de 1/1 oitava.	76
Quadro 6.15 - Valores dos tempos de reverberação por bandas de frequências de 1/1 oitava do auditório com cadeiras, condutas AVAC, superfícies refletoras, portas, painéis absorventes e difusores.	77
Quadro 6.16 - Valores da absorção sonora equivalente de um sistema composto por painéis de contraplacado de 3 mm de espessura associados a uma caixa de ar de 150 mm preenchida com	75

mm de lã mineral, colocados em parte das paredes laterais, por bandas de 1/1 oitava de frequência.	78
Quadro 6.17 - Valores dos tempos de reverberação previstos atualizados para a introdução do contraplacado em algumas paredes laterais.	79
Quadro 6.18 - Quadro síntese dos objetivos em termos de valores do tempo de reverberação para cada tipo de atividade que se venha a realizar futuramente no auditório do cineteatro de Esmoriz.	80
Quadro 6.19 - Valores da absorção sonora dos sistemas acusticamente variáveis, numa situação (Situação 1) em que os painéis de madeira estão completamente fechados, sem existir influência de absorção sonora do contraplacado.	83
Quadro 6.20 - Valores da absorção sonora dos sistemas acusticamente variáveis, numa situação (Situação 2) em que os painéis de madeira estão completamente abertos, existindo a influência de absorção sonora do contraplacado e do feltro absorvente de fibra natural colado na face “escondida” dos painéis de madeira.	84
Quadro 6.21 - Valores da absorção sonora equivalente (A) de cortinas grossas de algodão drapeadas, colocadas com um afastamento de 13 cm das paredes traseiras e laterais do auditório.	85
Quadro 6.22 - Quadro síntese das melhores combinações que resultam em tempos de reverberação idealmente melhores em função do tipo de utilização do auditório.	85
Quadro 6.23 - Valores finais dos tempos de reverberação por frequências em bandas de 1/1 oitava para espetáculos em que se deve privilegiar a palavra (Teatro, Cinema e conferências).	86
Quadro 6.24 - Valores finais dos tempos de reverberação por frequências em bandas de 1/1 oitava para espetáculos de música Pop/Rock.	86
Quadro 6.25 - Valores finais dos tempos de reverberação por frequências em bandas de 1/1 oitava para espetáculos de música de Câmara e Sinfónica.	87
Quadro 6.26 - Nível de pressão sonora produzido pelos equipamentos de ventilação (uma unidade rooftop e duas unidades de tratamento de ar).	99
Quadro 6.27 - Nível de potência sonora (Lw) à saída do ventilador da unidade rooftop de bomba de calor EO14 AH065, da Lennox, em função da banda de oitava de frequência [56].	100
Quadro 6.28 - Perdas sonoras por metro linear de condutas retangulares (em polegadas) revestidas com 5 cm de fibra de vidro [59].	100
Quadro 6.29 - Perdas sonoras por metro linear de condutas circulares (em polegadas) revestidas com 5 cm de fibra de vidro [59].	101
Quadro 6.30 - Perdas sonoras provocadas por cotovelos e curvas retangulares nas condutas [59].	101
Quadro 6.31 - Perdas sonoras provocadas por cotovelos e curvas circulares nas condutas [59].	101
Quadro 6.32 - Perdas sonoras provocadas pelas reflexões finais na conduta [59].	101
Quadro 6.33 - Valores dos níveis de pressão sonora produzidos no processo de insuflação de ar para o auditório, por banda de frequência de 1/1 oitava.	102
Quadro 6.34 - Níveis de pressão sonora do ruído provocado pela insuflação de ar no auditório após a colocação do atenuador sonoro XSA100-79-7-PF à saída da unidade rooftop.	103
Quadro 6.35 - Valores dos níveis de pressão sonora produzidos no processo de extração de ar do auditório, por banda de frequência de oitava.	104
Quadro 6.36 - Níveis de pressão sonora do ruído provocado pela extração de ar do auditório após a colocação do atenuador sonoro XSA100-67-9-PF à saída da unidade rooftop.	105
Quadro 6.37 - Níveis de pressão sonora totais tendo em conta a simultaneidade de funcionamento do processo de insuflação e extração de ar, contabilizando as perdas originadas pela presença dos atenuadores sonoros.	105
Quadro 6.38 - Valores da redução sonora (R) da solução construtiva adotada para as paredes de separação entre os foyers e o auditório, utilizando o método teórico de Meisser.	108
Quadro 7.1 – Valores do Tempo de Reverberação do auditório do cineteatro de Esmoriz, por banda de 1/1 oitava de frequência, medidos na situação inicial (sem cadeiras e sem pessoas).	113
Quadro 7.2 – Valores previsíveis do tempo de reverberação do auditório do cineteatro de Esmoriz, por banda de 1/1 oitava de frequência, obtidos após se contabilizarem os efeitos dos materiais indispensáveis ao funcionamento da sala e à colocação de contraplacado de 3 mm.	114
Quadro 7.3 – Valores do Tempo de Reverberação previsíveis através do projeto de acústica variável para os diferentes tipos de utilização do auditório.	115
Quadro 7.4 - Níveis de pressão sonora do ruído produzido pelo sistema de ventilação no auditório do cineteatro de Esmoriz.	116

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

τ	–	Coeficiente de transmissão sonora
α	–	Coeficiente de absorção sonora
λ	–	Comprimento de onda [m]
A	–	Absorção sonora equivalente [m ²]
AVAC	–	Sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado
BR_L	–	Rácio de baixos baseado na intensidade sonora (<i>Bass ratio based on sound level</i>)
BR_RT	–	Rácio de baixos baseado no tempo de reverberação (<i>Bass ratio based on reverb time</i>)
c	–	Celeridade do som [m/s]
C_{80}	–	Claridade (<i>Early to late sound index</i>) [dB]
D_{50}	–	Definição (<i>Early to total sound index</i>) [dB]
$D_{nT,w}$	–	Índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado [dB]
$D_{2m,nT,w}$	–	Índice de isolamento sonoro de fachadas a ruídos de condução aérea padronizado [dB]
EDT	–	Tempo de decaimento curto (Early Decay Time) [s]
f	–	Frequência [Hz]
G	–	Índice de direcionalidade
I	–	Intensidade sonora [W/m ²]
I_0	–	Intensidade sonora de referência [10^{-12} W/m ²]
ITDG	–	Tempo de atraso inicial (<i>Initial time delay gap</i>) [s]
LA_{eq}	–	Nível de pressão sonora equivalente [dB]
L_I	–	Nível de intensidade sonora [dB]
L_p	–	Nível de pressão sonora [dB]
L_w	–	Nível de potência sonora [dB]
$L'_{nT,w}$	–	Nível de pressão sonora padronizado [dB]
LF	–	Fração de energia lateral

- m – massa superficial do material [kg/m^2]
- NC – Critério de ruído (*Noise criterion*)
- p – Pressão sonora [Pa]
- p_o – Pressão sonora de referência [2×10^{-5} Pa]
- ρ – Massa volúmica [kg/m^3]
- Q – Coeficiente de direcionalidade
- R – Índice de redução sonora [dB]
- R' – Índice de redução sonora aparente [dB]
- RRAE – Regulamento dos requisitos acústicos de edifícios
- r – Distância [m]
- S – Superfície real do material [m^2]
- TR – Tempo de reverberação [s]
- TS – Tempo central [s]
- UTA – Unidade de Tratamento de Ar
- V – Volume [m^3]
- W – Potência sonora [W]
- W_o – Potência sonora de referência [10^{-12} W]

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

Um auditório é um espaço destinado à realização de múltiplas atividades culturais sejam elas música, cinema, teatro ou conferências. Como tal, é de extrema relevância que estes espaços possuam um conforto acústico favorável para que os ouvintes possam usufruir de uma plena experiência cultural.

Neste tipo de espaços, em que o som é a substância mais importante, deve colocar-se sempre como prioridade o estudo acústico aquando da conceção do projeto de execução do espaço. O aspeto estético não pode nunca sobrepor-se à qualidade acústica da sala, porque se isso acontece, uma boa experiência do evento por parte do ouvinte e do executante pode ser posta em causa.

Em Portugal, nos últimos anos, a situação tem vindo a melhorar, depois de um passado em que as questões acústicas eram menosprezadas e apareciam como a menor das prioridades na conceção destes espaços culturais. Nas décadas de 1980/90, a maior parte das salas de espetáculo não possuíam projeto acústico de importância significativa. A prova de que a situação se tem alterado nos últimos anos encontra-se no investimento em projetos acústicos de novos espaços como os teatros de Vila Real, de Bragança, Teatro Helena Sá e Costa no Porto e, em maior escala, a Casa da Música ou a *Super Bock Arena* (Pavilhão Rosa Mota), também no Porto.

Atualmente, a maior parte deste tipo de salas denominam-se como espaços multiusos, com o objetivo de serem capazes de receber qualquer tipo de espetáculo das diferentes áreas das artes. O auditório do cineteatro de Esmoriz, em estudo nesta dissertação, não foge à regra. Este facto obriga a que seja realizado um estudo acústico multifacetado, na perspetiva de ir ao encontro das necessidades acústicas de cada atividade que será acolhida por este espaço.

O objetivo desta tese passa, portanto, por realizar um projeto acústico do auditório do cineteatro de Esmoriz que, foi já um espaço de realização de múltiplos eventos culturais no passado e que se encontra atualmente em processo de reabilitação.

O projeto nesta tese terá de ser estudado, como já foi referido, para uma acústica variável da sala e tem como ponto de partida a medição dos valores do tempo de reverberação do espaço ainda antes do começo das obras de remodelação. Tendo como objetivo a conceção de um projeto de acústica variável, o tempo de reverberação será o principal parâmetro a ter em maior consideração, pois, será este que nos vai permitir projetar a sala, de forma a que consigamos obter uma boa inteligibilidade e clareza seja em atividades a haver com a palavra ou música, respetivamente.

1.2. ESTRUTURA

A presente dissertação será dividida em oito capítulos:

- O primeiro capítulo com o título “Introdução” explica onde se enquadra o tema desta dissertação, a sua história e os objetivos que se pretendem atingir.
- O segundo capítulo com o título “Conceitos e definições” tem como objetivo explicar conceitos primários e basilares da acústica que serão importantes conhecer para o decorrer desta dissertação.
- O terceiro capítulo “Estado da arte” contextualiza o tema da acústica em auditórios em termos históricos e o conhecimento existente na conceção deste tipo de espaço, incluindo regras e parâmetros importantes na conceção de um projeto acústico tanto no ponto de vista de valores ideais como do cumprimento do *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE)*
- O quarto capítulo com o título “Cineteatro de Esmoriz” apresenta uma caracterização do auditório e espaço envolvente do cineteatro. São apresentadas as medições e posteriores análises, bem como, a metodologia usada para obtenção desses valores.
- O quinto capítulo com o título “Medições acústicas” expõe as medições realizadas e posteriores análises, bem como, a metodologia usada para a obtenção desses valores.
- O sexto capítulo com o título “Propostas de intervenção no projeto” apresenta os valores ideais a atingir, o estudo acústico realizado e as consequentes propostas de intervenção tanto a nível de correção acústica como de isolamento sonoro.
- O sétimo capítulo com o título “Conclusões e desenvolvimentos futuros” expõe as conclusões que se conseguiram retirar do trabalho realizado e os possíveis desenvolvimentos futuros.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. PRINCÍPIOS BÁSICOS

2.1.1. SOM E RUÍDO

As alterações de pressão no ar através de ondas sonoras podem ser sensivelmente captadas pelo sistema auditivo que posteriormente desencadeia no cérebro a percepção de se ouvir um Som. Portanto, o som para existir, necessita de um sistema recetor com sensibilidade para captar essas alterações de pressão. Por exemplo, um microfone funciona com uma deteção de variações de pressão que, por impulsos magnéticos, consegue descodificar o som e registá-lo num aparelho de gravação, tal como acontece num sistema auditivo humano [1].

A passagem de uma onda sonora faz com que as partículas do ar se movam para trás e para a frente paralelamente à direção do movimento da onda, criando áreas de compressão e de rarefação (Figura 2.1). As áreas de compressão são associadas a pressões mais altas e as de rarefação a pressões mais baixas [2].

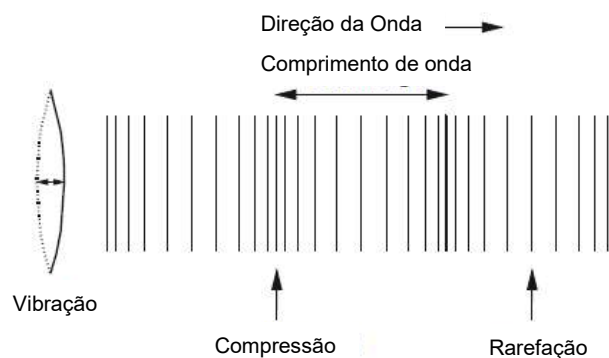


Figura 2.1 - Propagação do som em meio elástico (Adaptado de [2]).

A distinção entre “som” e “ruído” resulta de uma percepção subjetiva do ser humano em resposta às variações de pressão. O que é som para uma pessoa, pode ser ruído para outra, tudo depende do resultado de uma dada vibração no cérebro. Se essa sensação for agradável ou tiver significado é assumida como som, se for desagradável é assumida como ruído [1].

A, já referida, variação de pressão resulta do choque entre partículas, sem deslocamento permanente das mesmas, portanto será esse o parâmetro mais importante a medir, sempre tomando como referência o valor da pressão atmosférica de cerca de 101 400 Pa. São as variações de pressão sonora em torno da pressão atmosférica que o sistema auditivo do ser humano consegue captar (Figura 2.2) [1].

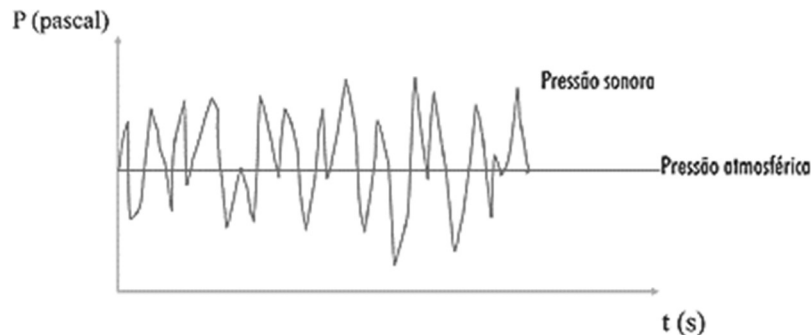


Figura 2.2 - Pressão sonora e pressão atmosférica (Adaptado de [2]).

A velocidade de propagação do som no ar é dada pela expressão de celeridade (2.1), válida para ar seco e ao nível do mar. Percebe-se então, que a velocidade de propagação das ondas sonoras depende exclusivamente da temperatura no ar [1].

$$c = 20,045 \sqrt{T}, \text{ com } T(K) = 273,15 + \theta (^{\circ}C) \quad (2.1)$$

Sendo,

c – celeridade (m/s);

T – temperatura em Kelvin (K);

θ - temperatura do ar ($^{\circ}C$).

2.1.2. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA

A propagação sonora, para além da pressão, pode se analisada por outros dois prismas, a intensidade sonora (I) e a potência sonora (W) (Figura 2.3).

A intensidade sonora é descrita, numa determinada direção, como a quantidade média de energia que atravessa por segundo uma área de 1 m^2 , normal a essa direção e mede-se em W/m^2 . Tem lógica, assumir um campo de intensidade sonora como um campo vetorial, pois, este permite avaliar a componente direcional como uma grandeza vetorial e não escalar [1].

A potência sonora tem que ver com a fonte a partir da qual partem as ondas sonora e caracteriza-se como sendo a energia total que atravessa uma esfera imaginária de um dado raio centrada na fonte, num segundo. O valor dessa energia total quantifica-se em W [1].

Pode então perceber-se que enquanto a potência sonora é a causa, a intensidade sonora é a consequência [1].

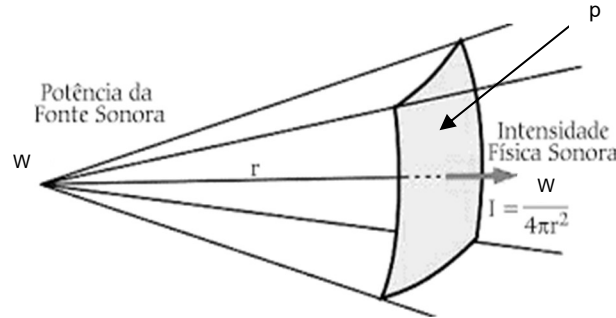


Figura 2.3 - Relação entre potência (W), pressão (p) e intensidade (I) (Adaptado de [2]).

Uma fonte sonora pontual provoca alterações na sua envolvente, na pressão sonora, temperatura e massa volúmica. Estas três grandezas podem ser relacionadas entre si da seguinte forma :

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (2.2)$$

Sendo,

- I – intensidade sonora (W/m^2)
- W – potência sonora (W);
- r – distância (m);
- p – pressão sonora (Pa);
- ρ – massa volúmica (kg/m^3);
- c – celeridade (m/s) [1].

2.1.3. NÍVEIS SONOROS

Um ser humano jovem com uma audição normal consegue ouvir valores da variação de pressão de 10^{-5} Pa (limiar da audição) a 100 Pa (limiar da dor). Pode então perceber-se que a audibilidade humana apresenta uma gama de 10^7 Pa no domínio da pressão sonora. Sabendo que a resposta do ouvido humano aos estímulos sonoros comportava-se de uma forma praticamente logarítmica, e não linear, começou a utilizar-se outra unidade para medir esta grandeza, o decibel (dB) [1].

Desta forma, utilizam-se as expressões (2.3) como fórmula de conversão de pressões (p) em níveis de pressão sonora (L_p).

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p}{p_o} \right) \text{ ou } L_p = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_o^2} \right) \quad (dB) \quad (2.3)$$

Sendo, p_o a pressão sonora de referência com o valor de 2×10^{-5} Pa.

O que acontece na realidade é que seja na vida quotidiana, quer num concerto de música, não existe apenas uma, mas sim várias fontes sonoras com respetivos níveis de pressão sonora. Visto, que o nível de pressão sonora advém de um processo de conversão logarítmica, a soma dos diferentes níveis de pressão sonora não será feita de forma algébrica, mas sim recorrendo à expressão (2.4) [1].

$$L_{total} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (2.4)$$

Sendo,

L_{total} – nível de pressão sonora total (dB);

L_i – nível de pressão sonora de cada fonte i .

2.1.4. DIRECIONALIDADE

Em geral, as fontes não são omnidirecionais, ou seja, não enviam a mesma energia em todas as direções. Os parâmetros utilizados para estudar esta particularidade são o coeficiente de direcionalidade (Q) e o índice de direcionalidade (G) [1].

O coeficiente de direcionalidade relaciona a intensidade sonora propagada numa dada direção com a que na mesma direção, uma fonte omnidirecional da mesma potência total propagaria. Para uma fonte omnidirecional colocada numa sala, podemos ter as quatro seguintes situações:

- Fonte colocada no centro geométrico de uma sala resulta num valor de $Q = 1$;
- Fonte colocada junto a uma parede ou teto, o valor de Q será de 2;
- Fonte colocada num canto (a meia altura da parede) resulta num valor de $Q = 4$;
- Fonte colocada num duplo canto, o valor de Q será de 8.

O índice de direcionalidade é dado em dB, numa dada direção, relacionando-se com o valor do coeficiente de direcionalidade, pela expressão (2.5) [1].

$$G = 10 \log Q \quad (2.5)$$

2.1.5. ANÁLISE EM FREQUÊNCIA

2.1.5.1. Definições

A frequência é uma das características mais importantes para se conseguir descrever um sinal sonoro. Muitas das vezes consegue-se distinguir fontes sonoras diferentes devido às frequências que emitem (Figura 2.4).

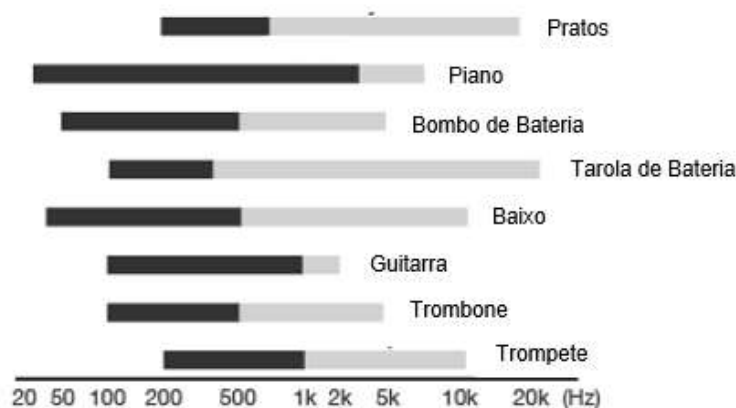


Figura 2.4 - Gama de frequências em instrumentos musicais (a preto, as frequências fundamentais e a cinzento os harmónicos de cada instrumento) (Adaptado de [3]).

As frequências medem-se em *hertz* (Hz) e podem dividir-se em três grandes zonas:

- Frequências Graves – 20 a 355 Hz;
- Frequências Médias – 355 a 1 410 Hz;
- Frequências agudas – 1 410 a 20 000 Hz.

Um jovem sem problemas auditivos consegue ouvir aproximadamente entre os 20 e os 20 000 Hz (Figura 2.5), contudo o ser humano não é capaz de diferenciar pequenas diferenças em frequência. Para frequências mais baixas consegue distinguir variações de frequência de cerca de 0,5 Hz, enquanto que para frequências altas só consegue distinguir para variações de cerca de 60 Hz [1].

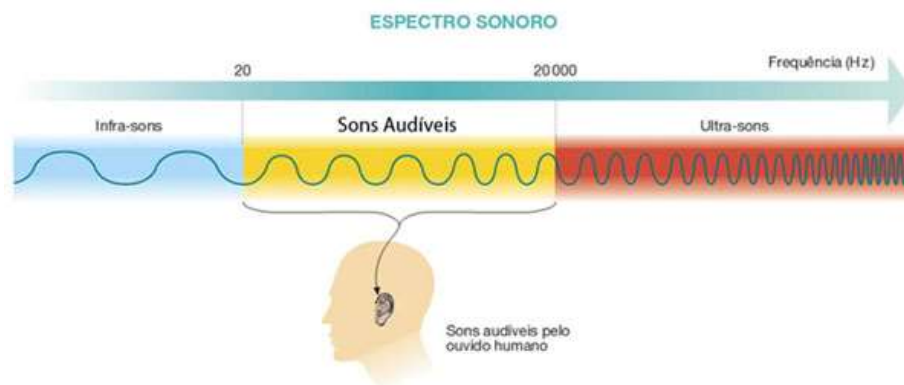


Figura 2.5 - Gama de frequências audíveis pelo ouvido humano [4].

Relacionando a análise em frequência com a acústica de auditórios, tanto a música como a palavra consistem em breves eventos sonoros separados por silêncios e ambos cobrem a maior parte da frequência audível mais especificamente entre os 100 Hz e os 10 000 Hz [2].

2.1.5.2. Curvas de ponderação

O ouvido humano apresenta uma sensibilidade auditiva variável conforme o valor da frequência, portanto, não consegue ouvir todas as frequências da mesma forma. Consegue ser muito pouco sensível para frequências abaixo dos 125 Hz e muito sensível em frequências altas entre os 2300 e os 2800 Hz [1]. Convém também perceber que a forma como o sistema auditivo ouve as frequências também depende da intensidade sonora do próprio som [1].

Com vista a corrigir a sensibilidade em alguns aparelhos para que estes se assemelhassem à forma como o ouvido humano capta as diferentes frequências, foram criadas curvas de ponderação, sendo que a mais usada é conhecida como curva ou filtro *A* (Quadro 2.1) [1].

Banda de Frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 oitava	Ponderação A para 1/1 oitava	Banda de Frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 oitava	Ponderação A para 1/1 oitava
25	-44,7	-40	800	-0,8	0
31	-39,4		1 000	0	
40	-34,6		1 250	0,6	
50	-30,2	-26	1 600	1,00	+1
63	-26,2		2 000	1,2	
80	-22,5		2 500	1,3	
100	-19,1	-15,5	3 150	1,2	+1
125	-16,1		4 000	1,0	
160	-13,4		5 000	0,5	
200	-10,9	-8,5	6 300	-0,1	-1
250	-8,6		8 000	1,1	
315	-6,6		10 000	-2,5	
400	-4,8	-3	12 500	-4,3	-7
500	-3,2		16 000	-6,6	
630	-1,9		20 000	-9,3	

Quadro 2.1 - Valores numéricos das ponderações da curva A na gama audível [1].

2.1.5.3. Comprimento de onda

O comprimento de onda (λ) caracteriza o tamanho das ondas sonoras em função da frequência (f) e da celeridade do som (c), (2.6). Esta característica sonora em termos da acústica de auditórios é extremamente importante para o dimensionamento de painéis refletores e para ter em atenção qualquer tipo de obstáculos que possam interferir com a propagação do som [2].

$$\lambda = c/f \quad (2.6)$$

Quando temos grandes comprimentos de onda associados a baixas frequências e um painel refletor de dimensões menores, existe um fenómeno de difração sonora e à recombinação das ondas após a passagem pelo objeto. Se fossem altas frequências, com comprimento de onda pequenos, a atingir o painel, iria haver reflexões das ondas não existindo, desta forma, a recombinação de ondas por detrás da superfície refletora (Figura 2.6) [2].

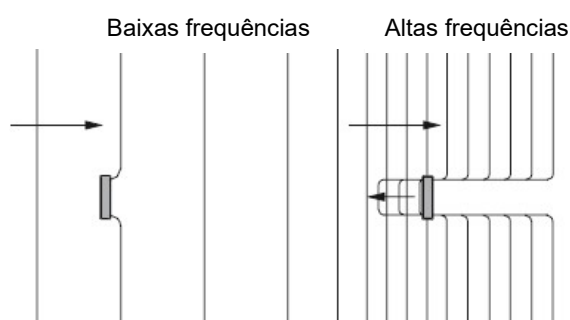


Figura 2.6 - Efeito do comprimento de onda face a obstáculos (Adaptado de [2]).

2.2. ABSORÇÃO SONORA

2.2.1. DEFINIÇÃO

A absorção sonora define-se como a capacidade dos materiais transformarem parte da energia sonora que incide sobre eles em qualquer outra forma de energia, maioritariamente, energia térmica (Figura 2.7). O coeficiente de absorção sonora (α) é o parâmetro que mede a quantidade de energia que é absorvida (2.7) e pode ter valores de 0 (nada absorvente) a 1 (totalmente absorvente). Por exemplo, uma superfície de mármore polido terá um valor de α muito próximo de 0, em contrapartida uma porta ou janela aberta terá um valor de α de 1 [1].

O valor de α não é sempre igual para o mesmo tipo de material. Este parâmetro varia com o ângulo de incidência na superfície e com a frequência do som incidente [1].

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.7)$$

Sendo,

E_{absorvida} – quantidade de energia absorvida pelo material;

E_{incidente} – quantidade de energia que atinge o material.

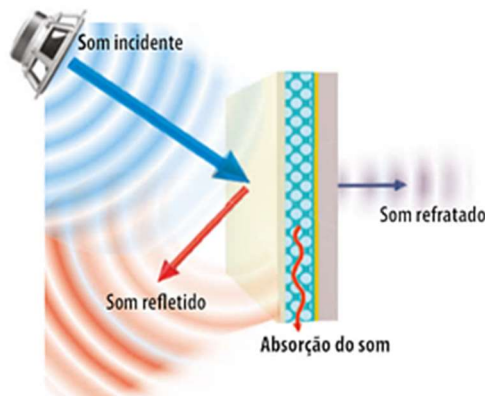


Figura 2.7 - Mecanismo da absorção sonora [5].

2.2.2. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS

2.2.2.1. Introdução

Como o valor do coeficiente de absorção sonora dos materiais depende da frequência do som incidente, existem materiais que absorvem melhor numa dada gama de frequências e pior noutra (Figura 2.8).

Os absorventes sonoros podem então associar-se em três grupos em função das suas características:

- Porosos e fibrosos (texturados) – mais eficaz na absorção das altas frequências;
- Ressonadores – mais eficaz na absorção de médias frequências;
- Membranas ressoadoras – mais eficaz na absorção de baixas frequências.

Deverá ter-se sempre em atenção que grandes áreas de materiais absorventes devem ser evitadas, pois podem levar a um silenciamento do som e a “buracos” na distribuição direcional do som [2].

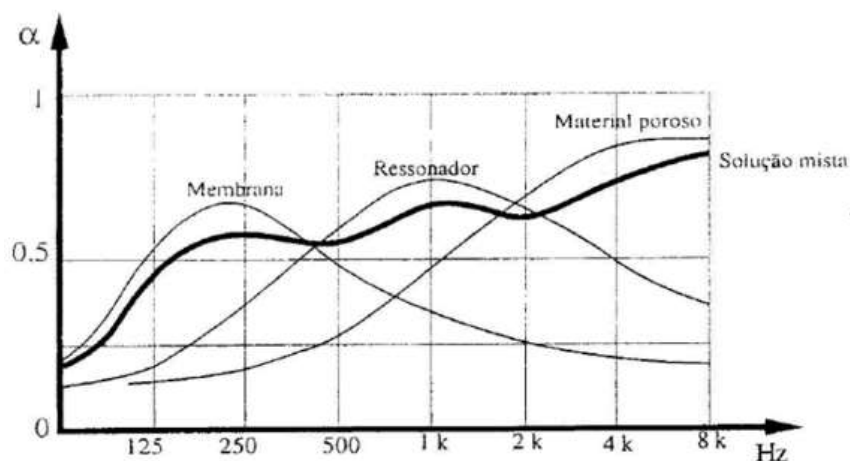


Figura 2.8 - Comportamento dos materiais absorventes sonoros, em função da frequência [6].

2.2.2.2. Materiais porosos e fibrosos

Como o próprio nome indica estes materiais têm como característica principal a existência de muitos poros e pequenos interstícios. A eficiência de absorção destes absorventes tem que ver com a quantidade de energia sonora que conseguem dissipar nos poros através da transformação desta em energia térmica [1].

Existe um conjunto de materiais que pelas suas componentes conseguem ser caracterizados como absorventes porosos e fibrosos, tais como:

- Tecidos e alcatifas (em que, a eficácia de absorção depende da espessura do pelo, porque quanto mais espessura tiverem mais conseguem absorver nas altas frequências; O grau de franzido do material (cortinas) leva a que haja um aumento de eficácia em todas as frequências);
- Argamassas porosas;
- Aglomerados de fibras de madeira;
- Fibras minerais (como por exemplo, lã de rocha que, se tiver espessura considerável consegue ter também um bom comportamento na absorção das baixas frequências, mas a espessura necessária para que isso aconteça é quase impraticável); [Barron]
- Materiais plásticos (como espuma de poliuretano e poliestireno expandido);
- Aglomerados negros de cortiça (normalmente com espessuras de 20 a 40 mm) [1].

2.2.2.3. Ressonadores

Estes tipos de absorventes sonoros podem-se dividir em dois tipos: os isolados e os agrupados. Ambos são eficazes na absorção de médias frequências, mas apresentam algumas diferenças.

Os ressoadores isolados, também conhecidos como ressoadores de cavidade ou de Helmholtz, comportam-se de forma diferente às diferentes frequências, em função do volume da cavidade e da sua restante geometria. A zona de eficácia destes materiais pode ser aumentada para as altas frequências com a colocação de material absorvente dentro do ressoador, embora este perca eficácia nas frequências médias [1]. Mas, por vezes, será preferível aumentar a faixa de frequências absorvidas mesmo que isso implique que haja uma diminuição do valor do coeficiente de absorção [2].

Os ressoadores agrupados são soluções mais exequíveis em relação aos isolados e caracterizam-se por painéis perfurados. A eficácia de absorção destes materiais depende da área de perfuração dos painéis, sendo que aos 25% de perfuração atinge-se a eficácia máxima. Geralmente este tipo de ressoadores são

associados a material poroso no seu interior, o que, como já foi explicado acima, aumenta a faixa de frequências absorvidas. Com a existência deste segundo absorvente, a partir dos 25% de perfuração do painel, a absorção fica controlada pela sua porosidade [1].

O dimensionamento destes ressoadores faz-se recorrendo à expressão (2.8).

$$f = \frac{10c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{(e + 1,6r) \cdot d}} \quad (\text{válido para } f \cdot d < 3400 \text{ Hz} \cdot \text{cm}) \quad (2.8)$$

Sendo,

P – percentagem de área perfurada (%);

r – raio de cada perfuração (cm);

e – espessura da placa perfurada (cm);

d – largura da caixa de ar (cm).

2.2.2.4. Membranas

As membranas, também conhecidas como painéis vibrantes, atuam essencialmente na absorção das baixas frequências e caracterizam-se por painéis de muito pouca espessura que conseguem dissipar a energia sonora através da perda de calor gerado pela fricção das fibras do material [1].

A absorção e dissipação da energia ocorre para a frequência natural de vibração dada pela expressão (2.9).

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{m \cdot d}} \cong \frac{60}{\sqrt{m \cdot d}} \quad (2.9)$$

Sendo,

c – celeridade (m/s);

ρ – massa volúmica do ar;

m – massa superficial do material (kg/m²);

d – espessura da caixa de ar (m).

2.2.3. ABSORÇÃO SONORA EM AUDITÓRIOS

Um dos maiores problemas associado à absorção sonora em auditórios é prever quais serão os coeficientes de absorção sonora dos lugares ocupados e não ocupados da plateia. Em auditórios, as principais superfícies absorventes são a plateia (e os artistas) que absorvem cerca de 90 % da energia incidente referente a médias/altas frequências [2].

O grau de estofamento dos assentos condiciona significativamente a absorção da sala. Quanto maior o estofamento, maior o coeficiente de absorção dos assentos, sendo, logicamente, este valor agravado quando existem pessoas sentadas (Figura 2.9) [2].

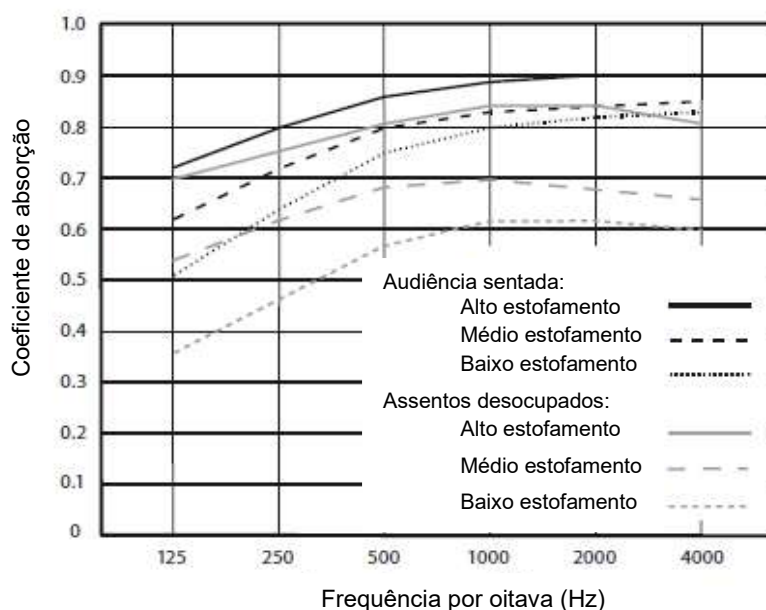


Figura 2.9 – Coeficientes de absorção sonora dos assentos da plateia, ocupados e desocupados, em função do “grau de estofamento” (Adaptado de [2]).

A principal gama absorvida pela audiência situa-se na zona das médias/altas, mas as baixas frequências também sofrem com o problema dos assentos. Estudos mostram que quanto menor for a inclinação da plateia, que provoca uma redução da visão direta ao palco, maior será a atenuação do nível sonoro das baixas frequências, pois a chegada de ondas sonoras diretas à plateia não será tão eficaz [7].

A figura 2.10 mostra uma medição da propagação do som em assentos de teatro segundo o comportamento da lei do quadrado inverso, realizada por Schultz e Watters onde se verifica uma atenuação significativa do nível sonoro na zona de frequências entre os 150 e os 250 Hz. Duas das estratégias para combater este problema passa por conseguir que a linha do som direto faça um ângulo de 15° com o plano de assentamento do assento (bancadas da plateia com inclinação maior ou igual a 15°) ou então criar reflexões laterais, através de painéis refletor colocados na lateral dos assentos, de forma a compensar a falta de som direto de baixas frequências [8].

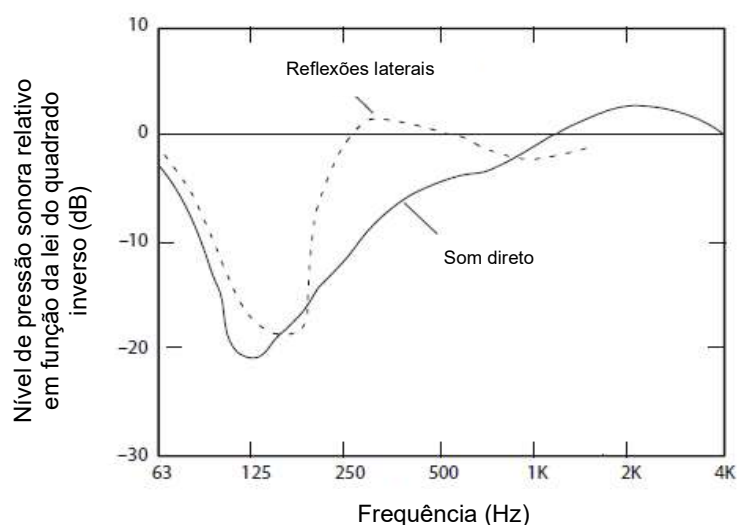


Figura 2.10 - Variação do nível de pressão sonora segundo a lei do quadrado inverso em função da frequência, devido aos efeitos dos assentos da plateia (Adaptado de [8]).

2.2.4. CAMPO DIRETO E CAMPO REVERBERADO

Numa sala, o nível de pressão sonora em qualquer ponto é determinado pela sobreposição de dois campos sonoros, o direto e o reverberado. O som direto dá ao recetor a sensação de intimidade enquanto que o som refletido dá a sensação de envolvimento [9].

O campo direto tem origem nas ondas sonoras recebidas diretamente da fonte sonora. Este campo é o que contribui maioritariamente para o nível de pressão sonora na sala e decresce com a distância à fonte, pois para cada duplicação da distância existe uma redução de 6 dB. Se o objetivo, numa determinada sala, for reduzir o nível sonoro atuando unicamente no campo direto, deve-se diminuir a direcionalidade da fonte sonora ou colocar ecrãs [1].

O campo reverberado tem origem nas ondas refletidas nas superfícies da sala que podem ser divididas em ondas de reflexão precoce e ondas de reflexão tardias. Se fosse necessário diminuir o nível sonoro atuando unicamente no campo reverberado, a solução passava por aumentar a absorção sonora da sala, colocando materiais absorventes nas superfícies refletoras [1].

O nível de pressão sonora da sala depende então de um campo direto e de um campo reverberado, e pode ser determinado pela expressão seguinte (2.10) [1].

$$L_p \approx L_i = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (2.10)$$

Sendo,

L_p – nível de pressão sonora (dB);

L_i – nível de intensidade sonora (dB);

L_w – nível de potência sonora da fonte (dB);

Q – coeficiente de direcionalidade da fonte;

r – distância entre a fonte sonora e o ouvinte (m);

R – “constante R do local” = $A/(1-\alpha_{\text{médio}})$ (m^2).

2.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

2.3.1. DEFINIÇÃO

Como foi explicado no subcapítulo 2.2.4, um recetor recebe ondas sonoras de origem direta e refletida. As ondas diretas atingem o recetor num percurso em linha reta desde a fonte sonora. As ondas refletidas atingem o ouvinte após reflexões nas superfícies existentes na sala [1].

Numa grande sala de concertos, um espectador pode receber cerca de 8000 reflexões no espaço de 1 segundo, sendo que cada reflexão tem um atraso, um nível sonoro e uma direção associada a ela [10].

Denomina-se então como tempo de reverberação, o intervalo de tempo que um determinado som demora a extinguir-se por completo no espaço, após múltiplas reflexões. Em termos práticos, é o tempo que demora a um dado som diminuir 60 dB no seu nível de pressão sonora. Na realidade, e na maior parte dos casos mede-se o tempo de reverberação para um decaimento de apenas 30 dB e depois, através do declive da reta de melhor ajuste, extrapola-se para um decaimento de 60 dB (Figura 2.11). O tempo de

reverberação é medido desta forma pois o ruído de fundo irá sobrepor-se antes do desaparecimento do som emitido [1].

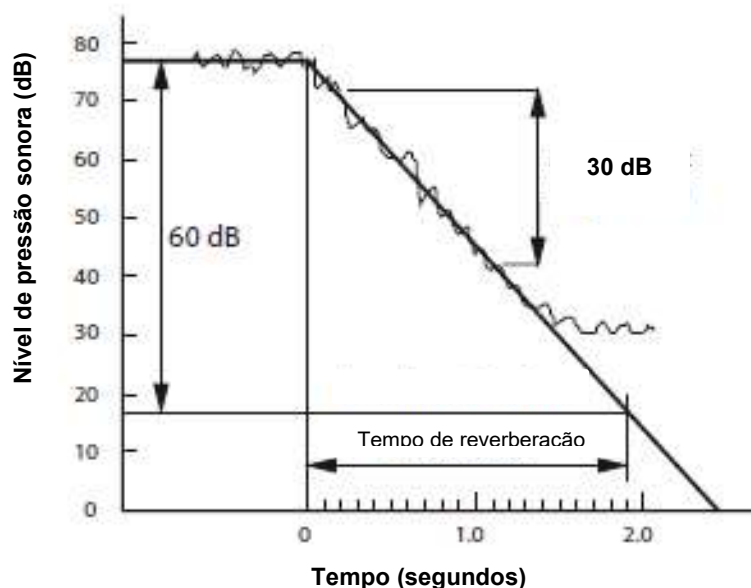


Figura 2.11 - Tempo de reverberação (valor obtido por extrapolação do declive da reta de melhor ajuste para um decaimento de 30 dB do nível sonoro) (Adaptado de [2]).

Em alguns casos, o decaimento não é linear e consequentemente não se consegue medir o tempo de reverberação. Isto acontece quando existem espaços acoplados com tempos de reverberação próprios, diferentes [11].

O tempo de reverberação da sala é condicionado pelo volume do espaço e pela absorção sonora total. As altas frequências são fortemente absorvidas pela plateia e também pelo próprio ar da sala que a partir dos 2 kHz apresenta um grande mecanismo de absorção. O tempo de reverberação da sala é então bastante condicionado pelo grau de absorção. Para as baixas frequências, a reverberação é condicionada maioritariamente pelo pé-direito da sala e consequente volume [11].

O tempo de reverberação é, portanto, o parâmetro mais importante a ter em conta na acústica de espaços fechados e é geralmente constante em toda a sala [11].

2.3.2. FÓRMULAS DE PREVISÃO

2.3.2.1. Fórmula de Sabine

Uma das formas de se conseguir prever o tempo de reverberação é através da expressão de Sabine (2.11) que permite obter valores muito próximos da realidade para salas com campos sonoros difusos e um coeficiente de absorção sonora médio menor que 0,20 [1].

$$T = \frac{0,16V}{\sum_{i=1}^N \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^M A_j + mV} \quad (2.11)$$

Sendo,

T – tempo de reverberação (s);

V – volume da sala (m^3);

α – coeficiente de absorção sonora do material;

S – superfície real do material (m^2);

A – absorção sonora localizada (m^2);

m – absorção sonora do ar (m^{-1}) em função da humidade relativa (Quadro 2.2).

Quadro 2.2 - Absorção sonora do ar (m^{-1}) em função da humidade relativa (HR) [1].

	< 1 kHz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	16 kHz
0	0	0	0	0	0	0
20	0	0,008	0,016	0,056	0,188	0,34
40	0	0,004	0,008	0,044	0,096	0,21
60	0	0,003	0,004	0,028	0,064	0,14
80	0	0,002	0,004	0,008	0,052	0,11

2.3.2.2. Fórmula de Eyring

Esta fórmula é mais adequada para situações em que todas as superfícies envolventes do local têm coeficientes de absorção semelhantes (2.12) [1].

$$T = \frac{0,16V}{-S \cdot \ln(1-\alpha')} \quad (\text{s}) \quad (2.12)$$

Sendo α' a média pesada pelas superfícies S_i e respetivos coeficientes de absorção α_i ($\alpha' = \sum \alpha_i \cdot S_i / \sum S_i$) e $S = \sum S_i$.

2.3.2.3. Fórmula de Millington-Sette

A fórmula de Millington-Sette (2.13) é mais adequada para situações em que existem diferenças significativas entre os coeficientes de absorção das diferentes superfícies [1].

$$T = \frac{0,16V}{-\sum_{i=1}^N S_i \cdot \ln(1-\alpha_i)} \quad (\text{s}) \quad (2.13)$$

2.3.3. VALORES IDEAIS

O valor ideal do tempo de reverberação é bastante subjetivo, pois depende bastante do gosto de cada pessoa e também das características acústicas da própria sala. Ainda assim existem alguns valores recomendados deste parâmetro para diferentes atividades que se possam realizar num auditório (Quadro 2.3). Para um bom comportamento acústico são pretendidos valores do tempo de reverberação mais baixos para uma melhor inteligibilidade da palavra e valores mais altos para uma clareza mais favorável na auscultação de música [2].

Quadro 2.3 - Valores ideais de tempo de reverberação em função do tipo de utilização da sala [1].

Função	TR 500 -1000 Hz (s)	Função	TR 500 -1000 Hz (s)
Auditório (palavra)	0,7 - 0,8	Música sinfónica Clássica	1,6 – 1,8
Teatro	0,7 - 0,9	Música sinfónica Romântica	1,9 – 2,2
Cinema	0,8 - 1,0	Música sinfónica Moderna	1,4 – 1,9
Ópera	1,3 - 1,8	Música popular	0,8 - 1,0
Música de câmara	1,4 - 1,7	Música de órgão	2,5 - 3,5
Música sinfónica Barroca	1,4 – 1,6	Coros gregorianos	3 - 4

Como o ouvido humano é muito menos sensível a frequências baixas, um aumento do tempo de reverberação em cerca de 40% na zona de 125 Hz em relação às outras frequências podem compensar este fenómeno auditivo (Figura 2.12). Este ajuste permite ao ouvinte ter uma percepção de que o tempo de reverberação é constante em todo o espectro de frequências e dá uma maior sensação de efeito espacial. O acerto do tempo de reverberação nas baixas frequências só é útil para música orquestral [12].

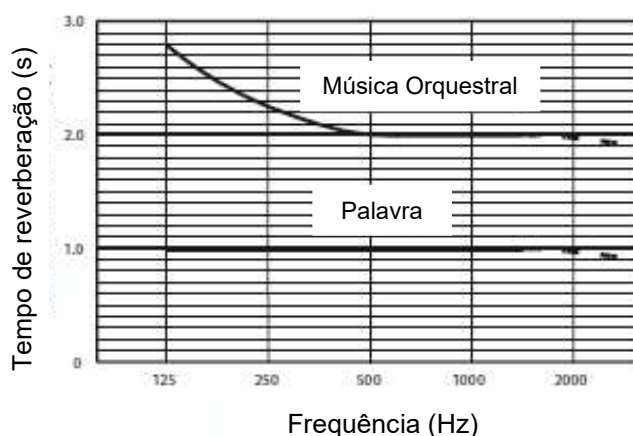


Figura 2.12 - Tempo de reverberação ideal nas várias frequências para música orquestral e para palavra (Adaptado de [2]).

2.4. ISOLAMENTO SONORO

2.4.1. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

2.4.1.1. Introdução

O isolamento sonoro de elementos construtivos depende da transmissão sonora entre duas áreas, mais concretamente, entre um emissor e um recetor. Esta transmissão pode ser realizada, de uma forma mais simples, por um só elemento construtivo, mas na generalidade o estudo de isolamento sonoro faz-se para uma transmissão global em que se tem em consideração toda a envolvente direta entre os dois espaços.

As características importantes de um elemento construtivo para o isolamento sonoro prendem-se com a sua massa e/ou da existência de duplicação física do elemento separador [1].

O parâmetro que mede o isolamento sonoro dos materiais a ruídos aéreos é o R (redução sonora, em dB) dado pela expressão (2.14).

$$R = 10 \log (1/\tau) \quad (\text{dB}) \quad (2.14)$$

Sendo, τ o coeficiente de transmissão sonora.

Para medições realizadas *in situ*, a expressão (2.15) será útil para relacionar o valor da redução sonora aparente (R') com o isolamento sonoro padronizado (DnT). Como se trata de uma medição *in situ*, o valor da redução sonora aparente (R') contém já a influência das transmissões marginais [1].

$$DnT = R' + 10 \log \left(\frac{0,16V}{S \cdot T_o} \right) \quad (2.15)$$

Sendo,

V – volume do compartimento recetor (m^3);

S – superfície do elemento separador (m^2);

T_o – Tempo de reverberação de referência (0,5 s).

2.4.1.2. Elementos simples

O comportamento acústico de elementos simples depende da massa do elemento, da frequência do som incidente, da frequência crítica, das frequências próprias, do fator de amortecimento, do campo sonoro incidente, da permeabilidade, da rigidez, entre outros [1].

Existem, especialmente, dois tipos de frequências que precisam de ser controladas para que o elemento se comporte da melhor maneira possível. Essas frequências correspondem às de ressonância e à crítica.

As frequências de ressonância situam-se sempre na zona das muito baixas frequências, por vezes inaudíveis pelo ouvido humano, o que configura uma situação ideal para que ruídos não sejam captados pelas pessoas. As frequências de ressonância são as que fazem uma parede vibrar como se fosse uma placa de dimensões finitas controlada pelos modos próprios de vibração transversal. No ponto de vista do controlo deste problema é necessário procurar uma solução em que as frequências de ressonância sejam as mais baixas possíveis, mais especificamente, fora do limiar da audição [2].

A frequência crítica corresponde à coincidência entre a excitação causada à parede pela receção sonora e a vibração própria da parede. É, portanto, a frequência cujo comprimento de onda tem uma projecção no plano da parede que coincide com o comprimento de onda da frequência longitudinal das ondas de flexão da própria parede. Quando este fenómeno da coincidência acontece, nessa frequência o isolamento sonoro será praticamente nulo. A frequência crítica é dependente da elasticidade, massa e espessura da parede e da celeridade. Para frequências superiores à crítica, o isolamento sonoro a ruídos aéreos aumenta cerca de 9 dB por oitava, portanto, é de maior interesse o uso de materiais que tenham essa frequência na zona dos baixos, para que se consiga um maior isolamento nas frequências mais audíveis [1].

Para efeitos de projeto, torna-se importante utilizar métodos para previsão do isolamento sonoro dos elementos construtivos. Existem vários métodos de cálculo experimental, tais como:

- Método Sharp (método gráfico);
- Método empírico (só aplicável em paredes de betão normal (normal, leve e autoclavado) ou tijolo maciço);

- Método das transmissões marginais (método mais complexo e demorado, seguindo a norma EN12354);
- Método simplificado (método mais expedito em que $DnT, w \approx R_w - 2$, sendo R_w o valor da redução sonora de um dado material obtido por medições em câmaras reverberantes onde não existem transmissões marginais) [1].

2.4.1.3. Elementos duplos

Os elementos duplos caracterizam-se por uma duplicação de parâmetros, assumindo a existência de um meio elástico (ar) entre os dois elementos. Justifica-se a opção por este tipo de elementos pois apresentando uma menor massa superficial, conseguem garantir um melhor isolamento sonoro desde que sejam corretamente projetados. Conseguem-se ganhos de cerca de 5 a 9 dB de isolamento sonoro em relação a elementos simples [1].

Tal como nos elementos simples existem problemas de isolamento sonoro nas frequências de ressonância e de coincidência. A frequência de ressonância pode ser baixada em cerca de 30% com a colocação de material absorvente sonoro na caixa de ar. A frequência de coincidência deverá ter valores inferiores a 75 Hz para que seja inaudível e para que o crescimento de 18 dB por oitava do isolamento sonoro comece o mais cedo possível na gama de frequências. A frequência de coincidência é função da espessura da e preenchimento da caixa de ar e das massas superficiais de cada elemento constituinte da parede dupla. Uma boa prática para combater as frequências de coincidência passa por utilizar panos de paredes de espessura ou materiais diferentes [1].

Também existem vários métodos de previsão para obtenção de valores de redução sonora de elementos duplos, tais como:

- Método Sharp (método gráfico);
- Método Meisser (determina a redução sonora para a frequência de 500 Hz);
- Método das transmissões marginais (aplicando o modelo das transmissões marginais das paredes simples segundo a norma EN12354, com os devidos ajustes);
- Método empírico (obtém-se o valor de R_w a partir das expressões de paredes simples adicionando 3 a 5 dB de isolamento sonoro, respetivamente, com ou sem colocação de material absorvente na caixa de ar).

Outro dos problemas da utilização de elementos duplos tem que ver com o fenómeno da ressonância de cavidade que apresentam perturbações no isolamento sonoro em altas frequências. Este fenómeno tem origem na criação de modos estacionários com múltiplos de metades de comprimentos de onda $\left(\frac{n\lambda}{2}\right)$ na caixa de ar. Quanto mais rígida for a ligação entre os dois panos, menor será o isolamento sonoro [1].

Pode-se aumentar a eficácia do isolamento de elementos duplos através da colocação de material absorvente na caixa de ar. O efeito de absorção só é eficaz até aos 25% da largura da caixa de ar, sendo que além de 75% de material absorvente o ganho é insignificante. O efeito será maior em paredes leves, pois em paredes pesadas existe um grande efeito de transmissões marginais [1].

2.4.2. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO

Os ruídos de percussão podem ter um nível de incomodidade maior do que os ruídos aéreos já que a energia se reparte muito rapidamente pelo elemento que é percutido e por todos os outros elementos que estão rigidamente ligados a este [1].

A origem destes ruídos pode ser de fontes estáticas (ventilação, etc.) e de fontes de impacto (bater a porta, queda de objetos, etc.) [1].

Existem três formas de controlar estes ruídos: na fonte, no caminho de transmissão e/ou perto do recetor. Na fonte pode utilizar-se isolamento à vibração entre a fonte e a estrutura e aplicar camadas resilientes em superfícies sujeitas a impacto. Para controlar o caminho de transmissão podem-se criar descontinuidades estruturais de modo a que não haja propagação e aumentar amortecimento na estrutura que transmite vibração. Perto do recetor pode-se optar por criar um teto suspenso resiliente [1].

Para efeitos de medição *in situ*, a expressão (2.16) dá-nos o nível de pressão sonora padronizado ($L'nT$).

$$L'nT = Li - 10 \log \left(\frac{T}{To} \right) \quad (2.16)$$

Sendo,

Li – nível de pressão sonora média no compartimento recetor (dB);

T – tempo de reverberação no compartimento recetor (s);

To – tempo de reverberação de referência no compartimento recetor (0,5 s).

Para o dimensionamento e previsão do isolamento sonoro a ruídos de percussão, podemos recorrer ao método de Cremer em que o cálculo é efetuado segundo a norma *EN 12354-2* ou a um método simplificado no qual é possível realizar o cálculo de forma mais expedita.

O método simplificado só prevê isolamento sonoro a ruídos de percussão em lajes de betão com massas compreendidas entre 100 e 600 kg/m². O cálculo é dado pela expressão (2.17) em que é obtido o valor de $L'nT,w$ que representa o nível de pressão sonora padronizado médio contabilizando o efeito das transmissões marginais. Para converter os valores de $L'nT,w$ de dB/oitava para dB/terço de oitava, basta subtrair o primeiro por 5 dB [1].

$$L'nT,w = Ln,w - 10 \log(0,032V) + 2 \text{ (dB/terço de oitava)} \quad (2.17)$$

Sendo,

Ln,w – nível de pressão sonora no compartimento recetor (dB);

V – volume do compartimento recetor (m³).

2.4.3. RUÍDOS DE EQUIPAMENTOS

A vibração de um objeto só por si, geralmente, não produz um elevado nível sonoro, mas se o ligarmos a um largo painel, a energia transfere-se para este e podem transformar-se em sons aéreos incomodativos [1].

A avaliação da incomodidade sonora causada pelos equipamentos pode ser realizada através de curvas de incomodidade. Estas caracterizam ruídos de fundo contínuos e estáveis, geralmente, de sistemas AVAC. Uma das curvas mais usadas para a avaliação da incomodidade designa-se por *Noise Criterion (NC)*, e o método baseia-se, primeiramente, na medição do nível de pressão sonora por bandas de oitava desde os 63 até aos 8000 Hz. Posteriormente colocam-se os valores do nível da pressão sonora em função da frequência no gráfico (Figura. 2.13) e verifica-se a que curva corresponde à frequência com

o nível da pressão sonora mais elevado. Por último comparamos essa curva com os valores limites máximos de *NC* [1].

Para grandes auditórios, salas de concerto e de ópera são aconselháveis curvas inferiores à curva *NC-20*. Para auditórios mais pequenos para atividades como teatro e conferências pretende-se uma curva entre *NC-20* e *NC-30* [1].

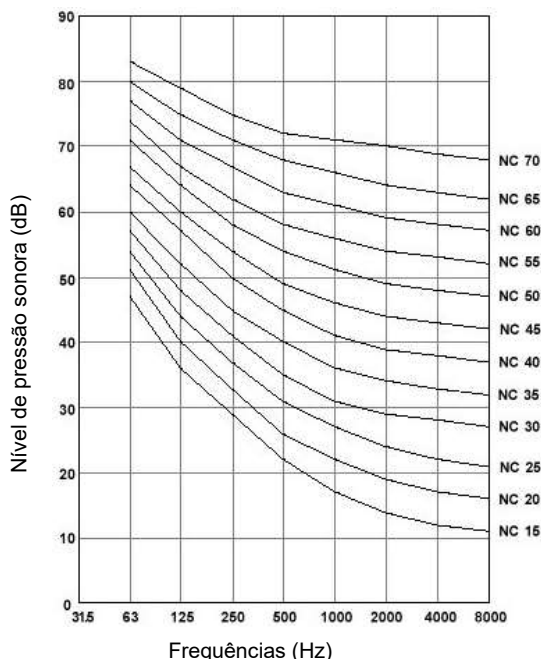


Figura 2.13 - Curvas de incomodidade (*Noise Criterion*) (Adaptado de [13]).

2.5. ACÚSTICA ARQUITETÓNICA

2.5.1. REFLEXÕES

2.5.1.1. Definição

As reflexões de ondas sonoras são dos elementos mais importantes na acústica de auditórios e dependem fundamentalmente da envolvente geométrica do espaço (Figura 2.14). Um espectador numa sala de espetáculos ouve primeiramente o som direto acompanhado logo de seguida pelas primeiras reflexões e posteriormente pelas reflexões tardias (reverberação). O som será constantemente refletido pelas superfícies até que a energia seja totalmente absorvida [11]. O intervalo de tempo entre o som direto e a primeira reflexão é chamado de tempo de atraso inicial (*initial time delay gap, ITDG*) [1]. As reflexões não terão um nível de pressão sonora tão elevado a menos que ocorra algum fenómeno de focalização (Figura 2.15) [11].

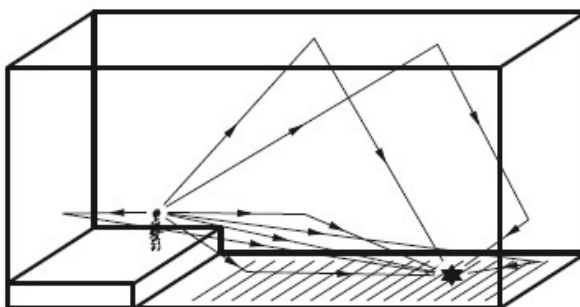


Figura 2.14 - Reflexões sonoras num auditório [2].

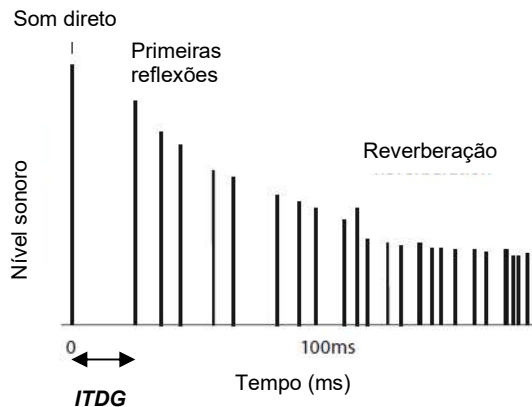


Figura 2.15 - Reflectograma de uma sala de espetáculos (ITDG – *initial time delay gap*) (Adaptado de [2]).

2.5.1.2. Reflexões e o ouvido humano

A grande maioria das reflexões iniciais e tardias fundem-se com o som direto criando uma experiência total do som. Mesmo existindo esta fusão, o ouvido humano é capaz de isolar o som direto e localizar de que lugar ele está a ser emitido pela fonte sonora, aliás, é capaz de o fazer até o mesmo quando é um pouco mais fraco que a combinação de energia das últimas reflexões [10].

Ainda que o ouvido humano tenha esta capacidade seletiva, é muito importante controlar as reflexões que possam existir num auditório. As reflexões tardias são importantes do ponto de vista da reverberação para criar uma sensação de som ambiente no espectador, mas devem ser muito bem controladas para não interferir negativamente no comportamento acústico da sala, pois podem criar problemas de clareza e inteligibilidade. De forma a garantir os dois últimos, é necessária uma boa distribuição de reflexões iniciais em todas as áreas do espaço que podem ser obtidas através de bem dimensionadas reflexões laterais colocadas perto dos ouvintes criando, inclusive, uma sensação de fonte sonora mais ampla (Figura 2.16) [2].

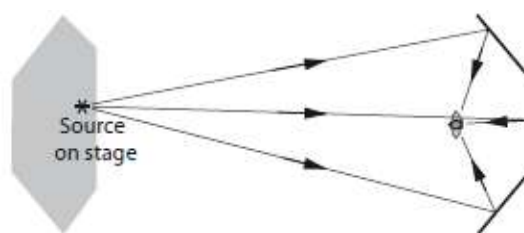


Figura 2.16 - Reflexões laterais a partir de superfícies refletoras colocadas perto do ouvinte [2].

2.5.1.3. Superfícies de reflexão

Para existirem reflexões têm de existir obrigatoriamente superfícies e estas podem ser de vários tipos, sendo que cada forma promove um comportamento reflexivo diferente (Figura 2.17). A forma plana é a mais simples e fácil de projetar, a convexa é usada quando, por qualquer motivo, a primeira produzir efeitos indesejáveis e por fim há a superfície côncava que provoca focalização das reflexões levando a que, em alguns pontos, o nível sonoro seja extremamente alto e possa ser ouvido como eco [7].

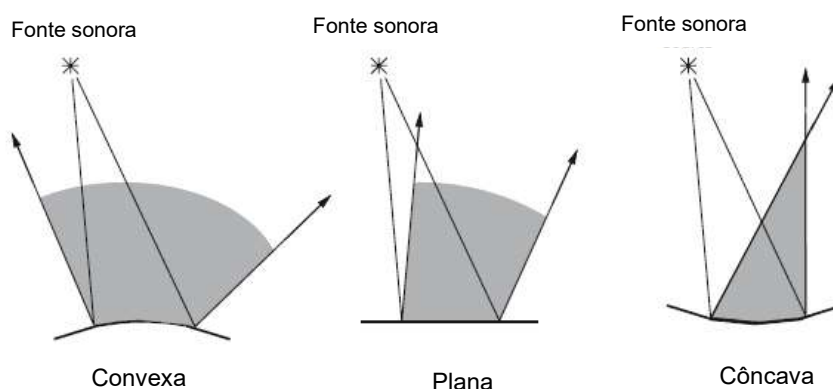


Figura 2.17 - Reflexão sonora em superfícies convexas, planas e côncavas (Adaptado de [2]).

A reflexão a partir de superfícies finitas depende da relação entre o seu tamanho e o comprimento de onda dos sons que nelas incidem. Como os sons de baixa frequência produzem grandes comprimentos de onda, torna-se mais difícil colocar superfícies com dimensões suficientes capazes de refletir esses sons. Portanto quando queremos um aumento do tempo de reverberação das baixas frequências, aconselhável para a música, é necessário que todas as superfícies laterais ou suspensas sejam suficientemente grandes para que possam produzir um maior número de reflexões. As frequências mais altas são mais facilmente refletidas pois como possuem um menor comprimento de onda, não necessitam de superfícies de grandes dimensões. Consegue perceber-se, então, que o tamanho do refletor influencia a gama de frequências sobre as quais é eficiente [2].

Para que uma superfície finita consiga obter reflexões eficazes ela dever seguir o princípio de ser colocada tangencialmente a uma elipse que tem a posição de origem e recetor em suas extremidades (Figura 2.18) [2].

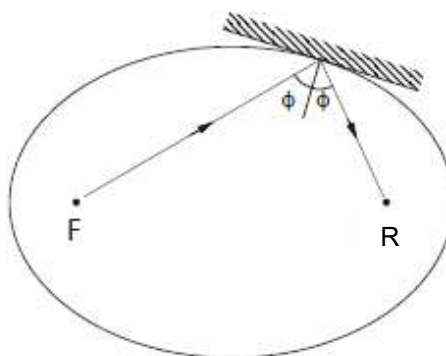


Figura 2.18 - Posição ideal de colocação de uma superfície em relação à fonte (F) e ao recetor (R) [2].

Na Figura 2.19, também são apresentadas elipses em função da distância da plateia ao palco. As superfícies refletoras devem ser colocadas em qualquer posição tangente à respetiva elipse para se conseguir obter um processo de reflexão eficaz em toda a sala. Estas elipses estão dimensionadas para a criação de reflexões iniciais com um atraso de 50 ms em relação ao som direto para permitir uma boa definição da *Palavra*. A superfície providenciará reflexões úteis em qualquer ponto do auditório [2].

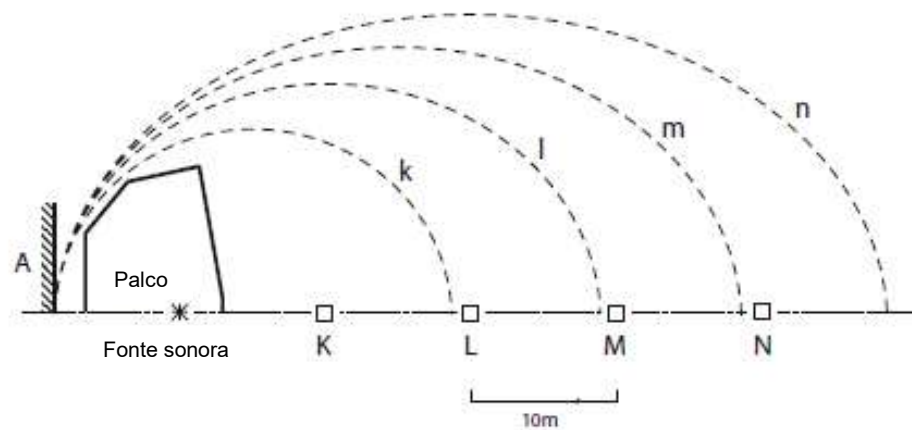


Figura 2.19 – Meia planta com elipses onde devem ser colocadas tangencialmente as superfícies de reflexão em função da distância ao palco correspondente a um atraso da reflexão de 50 ms (Adaptado de [2]).

Um dos problemas relacionados com a colocação de superfícies refletoras advém do facto da possível existência de coloração do som, que pode, indesejavelmente, manipular algumas frequências do som que é emitido diretamente. Este fenómeno acontece maioritariamente em superfícies suspensas no teto por cima do palco [2].

2.5.1.4. Ecos

Nem todas as reflexões são benignas na criação de um espaço com um bom comportamento acústico. Os ecos são fruto de reflexões que chegam ao ouvinte muito desfasadas temporalmente em relação ao som direto e que ao mesmo tempo possuem um elevado nível sonoro capaz de ser claramente distinguível pelo ouvido humano como um evento discreto das restantes reflexões (Figura 2.20). Este fenómeno acontece apenas para reflexões que tenham uma diferença temporal de pelo menos 50 ms em relação ao som direto [1].

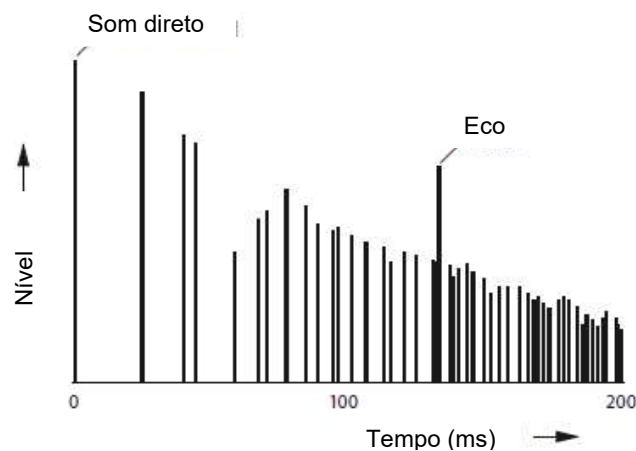


Figura 2.20 - Exemplo de refletograma com eco (Adaptado de [2]).

Ecos acontecem quando a reflexão viaja por um caminho mais simples, como por exemplo, o som direto viajar até à parte traseira do auditório e ser refletido para a plateia. O fenómeno também pode acontecer devido à presença de superfícies côncavas que focalizam as reflexões aumentando gravemente o seu nível sonoro [1].

Os ecos produzidos nas paredes mais distantes em relação à fonte sonora podem ser tratados com a mudança de inclinação destas (cerca de 5°), com a colocação de absorvente nessas superfícies ou aplicando um tratamento de difusão para espalhar o som (Figura 2.21) [2].

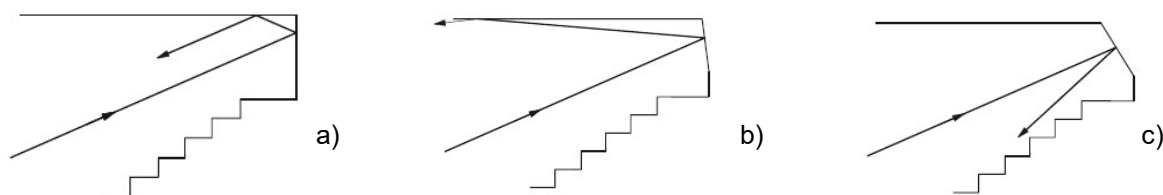


Figura 2.21 - Ecos produzidos nas paredes traseiras de um auditório. Situação a) - ecos enviados para o palco. Situação b) - solução de inclinar a parede (eliminação de ecos indesejados). Situação c) - excesso de inclinação da parede (ecos para a plateia) [2].

Também devem-se ter em atenção os ecos repetidos (*flutter echoes*) que ocorrem entre duas paralelas regulares com nenhuma ou pouca absorção (Figura 2.22) [2].

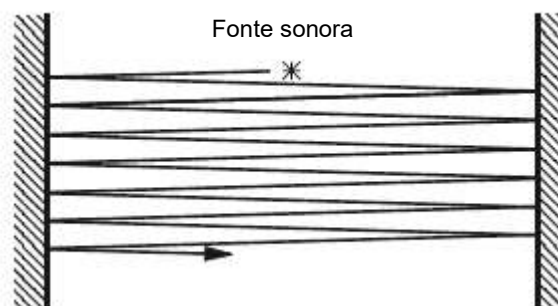


Figura 2.22 - Ecos repetidos (*flutter echoes*) entre duas paredes paralelas (Adaptado de [2]).

2.5.2. DIFUSÃO

Para que uma sala de espetáculos tenha um bom comportamento acústico é indispensável que esta tenha um campo sonoro difuso, capaz de distribuir reflexões por toda a plateia o mais uniformemente possível. Isto só é possível se a sala possuir superfícies “texturizadas” de modo a que consigam espalhar as reflexões em várias direções. Quanto maior for esse grau de “texturização”, maior será o grau de eficiência de dispersão. O tamanho das irregularidades condiciona que tipo de frequências consegue refletir, devido ao comprimento de onda específico de cada uma. Mas, geralmente variações nas irregularidades de 0,3 a 0,6 m deverão ser necessárias para cobrir a maior parte das frequências audíveis. Portanto, as superfícies regulares devem ser evitadas e deverá existir uma escolha seletiva das irregularidades em função das frequências que se pretendem dispersar [2].

Schroeder propôs um grupo de difusores eficaz com ranhuras de igual largura em que a profundidade de cada um, deriva de uma sequência matemática baseada em números primos. Estes difusores são denominados de difusores quadráticos (Figura 2.23) [14].

Outro tipo de difusores bastante utilizado é denominado de *Art Diffusor* (Figura 2.24). Superfícies onduladas são também uma boa opção para a otimização das reflexões por difusão (Figura 2.24).

Prever coeficientes de difusão contínua, ainda hoje, a ser difícil, conhecendo-se quase apenas o facto de serem necessários difusores para a produção de um campo difuso numa sala de espetáculos [2].



Figura 2.23 - Exemplo de um difusor quadrático [15].

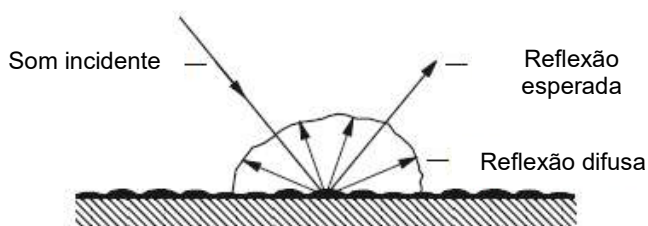
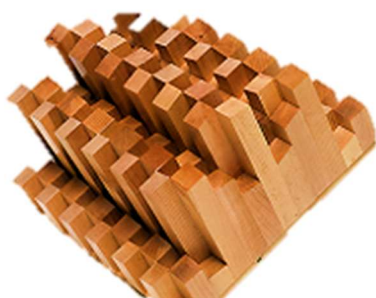


Figura 2.24 - Exemplo de um Art Diffusor (à esquerda) [16] e a difusão característica de superfícies onduladas (à direita) (Adaptado de [2]).

2.5.3. ACÚSTICA VARIÁVEL

2.5.3.1. Introdução

A acústica variável é necessária em salas que alberguem vários tipos de atividades diferentes que consequentemente exigem também comportamentos acústicos diferentes. Os auditórios dedicados a um só tipo de atividade/espetáculo não são os mais correntes (em especial na Europa e em pequenos países), na maior parte das vezes devido a razões económicas. Portanto é normalmente exigido um certo grau de flexibilidade na acústica de auditórios para que se possam realizar múltiplas atividades com alguma

qualidade. Embora a sala seja de uso múltiplo, o dono-de-obra deverá especificar qual a prioridade de utilização [2].

O instrumento mais valioso para estudar o tratamento acústico mais adequado a cada atividade é o tempo de reverberação. Isto, porque para a utilização de uma sala para fins musicais pretende-se um tempo de reverberação maior do que em atividades onde deve ser privilegiada a palavra. Portanto, será o tempo de reverberação ideal para cada atividade que irá condicionar, maioritariamente, a forma como se projeta um auditório multiuso [2].

Recorrendo à fórmula de Sabine, percebe-se que existem dois parâmetros que podem ser alterados de forma a modificar os valores tempo de reverberação que são o volume e a absorção sonora da sala. [2]

2.5.3.2. Variação no volume

A colocação de tetos móveis é uma das soluções possíveis quando se pretende variar o volume da sala e pode ser conseguido através da colocação de painéis móveis que oferecem a capacidade de abrir ou fechar volumes extra. Existem várias salas que possuem vários níveis de tetos a diferentes alturas, como é o caso do *Milton Keynes Theatre*, em Inglaterra (Figura 2.25) [2].



Figura 2.25 - Diferentes níveis de teto no *Milton Keynes Theatre* (Inglaterra) [2].

Um sistema que permite ter um teto amovível só faz sentido quando é possível obter uma área aberta para a parte superior do teto de pelo menos 40% de forma a se produzirem tempos de reverberação significativamente mais altos, sendo que para este caso o espaço deve comportar-se como um volume reverberante. Espaços vazios acima do teto que contenham estruturas e ventilação podem condicionar o acréscimo do tempo de reverberação [2].

Quando existe a possibilidade de alterar a posição dos painéis de teto no sentido vertical, estes devem estar mais baixos para diminuir o volume da sala e ao mesmo tempo fornecer maior número de reflexões aéreas quando se pretende privilegiar a palavra. Quando o objetivo é obter uma boa acústica para atividades relacionadas com a música, os painéis devem ser elevados em cerca de 30% em relação à situação anterior [2].

Em alguns casos, quando existe uma grande necessidade de aumentar o tempo de reverberação, utilizam-se câmaras reverberantes que aumentam substancialmente o volume e que funcionam como um espaço acoplado do auditório. Com vista a obter uma acústica variável, estas câmaras deverão conter portas

para permitir ou não, conforme as necessidades, a utilização desse volume extra. Estes espaços tendem apenas a influenciar a reverberação terminal da sala, pelo que os ouvintes são apenas cientes das câmaras durante as pausas no desempenho musical, tal é o caso da sala de concertos em Lucerna (Suíça) [2].

2.5.3.3. Variação na absorção

Utilizar a absorção para obter uma acústica variável é a solução mais comum e mais simples. Em pequenas salas, uma cortina retrátil é suficiente para mudar o caráter acústico. Por exemplo, para situações em que é necessária a diminuição do tempo de reverberação, baixam-se as cortinas aumentando, desta forma, a absorção da sala. Para influenciar consideravelmente o tempo de reverberação, a área de absorção ajustável deve ser bastante significativa [2].

Uma forma eficaz de tornar a sala variável na absorção passa pela utilização de painéis articulados com um lado refletor e outro acusticamente absorvente em que abas podem ser fechadas ou abertas de modo a escolher o tipo de face visível (Figura 2.26) [2].

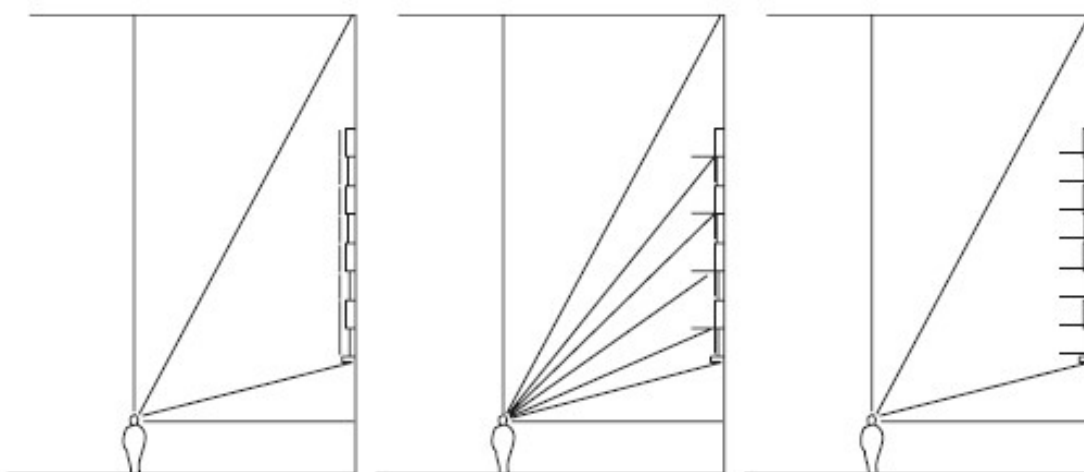


Figura 2.26 - Painéis articulados com superfícies absorventes ou refletoras [2].

Contudo, a técnica mais comum em salões modernos passa pela escolha de absorventes suspensos que são pendurados livremente e podem ser recolhidos em caixas bem seladas quando não são necessários. Para uma maior eficácia de absorção, tanto o peso como a porosidade, deste material, devem ser otimizados pois comporta-se melhor nas altas frequências [2].

Na Figura 2.27 pode ser observado um sistema bastante versátil acusticamente, utilizado no *IRCAM* (Instituto de Pesquisa e Coordenação de Música e Acústica) em Paris. Estes painéis contêm três prismas rotativos que podem ser mecanicamente virados de forma a escolher a superfície que se adequa a cada tipo de situação. Os prismas contêm superfícies reflexivas, difusoras e absorventes [2].

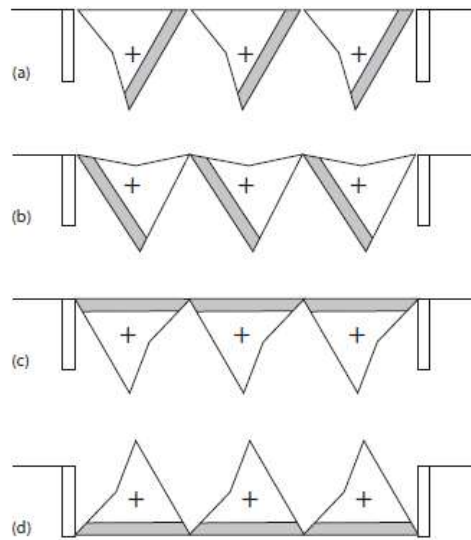


Figura 2.27 - a) superfícies de reflexão; b) superfícies de dispersão; c) superfícies absorventes; d) superfícies de alta difusão [2].

Dois dos problemas associados à utilização de material absorvente referem-se à diminuição do nível sonoro da sala e à perda de reflexões nas superfícies que absorvem as ondas sonoras. Portanto, é necessário um controlo cuidadoso na utilização de materiais absorventes e um estudo das repercussões que eles podem ter no comportamento acústico do auditório [2].

2.5.4. PARÂMETROS ACÚSTICOS

2.5.4.1. Parâmetros objetivos

A acústica de uma sala pode ser quantificada numericamente através de parâmetros objetivos ou subjetivos. Os parâmetros objetivos são obtidos com recurso a expressões onde são introduzidos valores energéticos ou temporais recolhidos através de equipamentos eletrónicos. Os parâmetros objetivos permitem avaliar o desempenho de cada sala em função do seu uso (música ou palavra) e são dados pelos seguintes descritores:

- **Tempo de reverberação (TR)** refere-se ao tempo que um som demora a diminuir 60 dB no seu nível de pressão sonora. É medido normalmente para um decaimento de 20 ou 30 dB (de -5 para -25 ou -35) e extrapolado, posteriormente, para um decaimento de 60 dB, multiplicando por um fator de 3 ou 2, respetivamente (2.18) [17].

$$\begin{aligned} TR_{20} &= 3[DS^{-1}(25) - DS^{-1}(5)] \\ TR_{20} &= 2[DS^{-1}(35) - DS^{-1}(5)] \end{aligned} \quad (s) \quad (2.18)$$

Sendo, $DS^{-1}(t)$ a função inversa do decaimento sonoro em função do tempo.

- **Tempo de Decaimento curto (EDT)** é, tal como o TR , o tempo que o som demora a enfraquecer 60 dB, mas com a diferença de ser medido para um enfraquecimento de 10 dB (de 0 para -10 dB) e ser multiplicado por um fator de 6 para permitir extrapolação (2.19) [18].

$$EDT = 6[DS^{-1}(10) - DS^{-1}(0)] \quad (s) \quad (2.19)$$

- **Clareza (C_{80})** é a razão em dB entre a energia sonora que chega nos primeiros 80 ms e a energia recebida posteriormente. Os 80 ms marcam o limite de perceptibilidade para a música e é dado pela expressão (2.20). Quanto mais energia chegar nos primeiros 80 ms, mais claro será o som [19].

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{dB}) \quad (2.20)$$

- **Definição (D_{50})** é a razão em dB entre a energia sonora que chega nos primeiros 50 e a energia total recebida. Os 50 ms marcam o limite de perceptibilidade em relação à palavra e é dado pela expressão (2.21). Quanto mais energia chegar nos primeiros 50 s, mais definição terá a palavra [20].

$$D_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{dB}) \quad (2.21)$$

- **Tempo central (TS)** é o momento exato em que a energia recebida antes desse ponto é igual à energia recebida posteriormente (2.22). É normal esse tempo central situar-se entre 140 e 180 ms em salas de concerto (em frequências entre 250 e 2000 Hz) [21].

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{ms}) \quad (2.22)$$

- **Intensidade sonora (L)** é a razão entre a energia total recebida num dado ponto da sala e a energia recebida pelo som direto isolado medido a uma distância de 10 metros da fonte num ambiente anecoico (2.23) [22].

$$L = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10m}^2(t) dt} \quad (\text{dB}) \quad (2.23)$$

- **Rácios de baixos (BR_{RT} – baseado no TR e BR_L – baseado em L)** são usados para avaliar o balanço tonal em que é feita a comparação dos tempos de reverberação (2.24) e intensidade sonora (2.25) entre as baixas frequências e as altas frequências [22].

$$BR_{RT} = [TR(125\text{Hz}) + TR(250\text{Hz})] / [TR(500\text{Hz}) + TR(1\text{kHz})] \quad (2.24)$$

$$BR_L = [L(125\text{Hz}) + L(250\text{Hz}) - L(500\text{Hz}) - L(1\text{kHz})] / 2 \quad (2.25)$$

- **Fração de energia lateral (LF)** é utilizado para avaliar o efeito da ampliação da fonte relacionando-o com a proporção que é recebida de lado nos primeiros 80 ms após o som direto. Este efeito é medido para as frequências entre 125 e 1000 Hz, sendo que o intervalo de valores recomendado se situa entre os 100 e 350 ms (2.26). É necessário ter em atenção que valores muito altos podem comprometer a percepção de que o som vem do palco [23].

$$LF = \frac{\int_5^{80} p^2(t) \cdot \cos^2 \theta \, dt}{\int_0^{80} p^2(dt)} \quad (s) \quad (2.26)$$

2.5.4.2. Parâmetros subjetivos

Os parâmetros subjetivos dependem da opinião pessoal dos ouvintes e como tal não existe uma sala de concertos que seja ideal para todos. Por vezes, torna-se importante e necessário relacionar alguns dos parâmetros objetivos com os subjetivos para se conseguir atingir uma melhor acústica na sala [7]. Os principais descritores usados para as salas de espetáculo são:

- **Ruído de fundo** refere-se aos ruídos produzidos por fontes sonoras não agradáveis e que perturbam o espetáculo, como por exemplo, o ruído de tráfego e sistemas de ventilação. Estes ruídos podem ser avaliados recorrendo a curvas de incomodidade.
- **Intensidade do som** representa o *volume* do som sentido pelos ouvintes nos auditórios. Essa intensidade sonora representa uma mistura das intensidades do som direto e do som reverberante.
- **Clareza do discurso musical** mede o grau de definição com que os sons são interpretados pelos ouvintes. Essa interpretação depende da forma como as notas musicais são ouvidas separada e distintivamente. O parâmetro da clareza é diretamente condicionado pelo tipo e posicionamento de superfícies refletoras existentes na sala.
- **Reverberância** representa o tempo que o som demora a desaparecer no espaço após a fonte sonora o ter emitido.
- **Eco** refere-se às reflexões atrasadas e com um elevado nível sonoro que são claramente audíveis.
- **Intimidade** tem que ver com a sensação de proximidade à fonte sonora pois está relacionada com o nível sonoro. Um auditório tem intimidade acústica quando o público sente que a música ouvida está a ser executada numa sala pequena. O limite aplicado a salas de concerto para a distância da audiência é de 40 metros tanto por razões visuais como acústicas. [Barron, 1988]
- **Direcionalidade** representa a sensação de que o som é recebido diretamente da fonte sonora que está a ser visualizada. Este parâmetro pode ser comprometido se existirem fortes reflexões laterais que criam a sensação de que o som chega de um ponto diferente daquele em que se observa que se encontra a fonte sonora.
- **Envolvimento** refere-se à sensação dos ouvintes estarem ou não rodeados de som. É condicionado pela forma como o som reverberante se distribui pelo auditório. Uma sala com um campo sonoro difuso, é uma sala em que o público se sente envolvido pelo som pois tem a sensação de que a energia sonora que lhe chega é igual em todas direções.
- **Equilíbrio tímbrico** tem que ver com o balanço entre os níveis sonoros das altas e baixas frequências. É a sensação de que a receção de todos os tipos de frequência é feita de forma igual.
- **Impressão geral** refere-se à avaliação geral da qualidade acústica da sala.

Outras avaliações subjetivas estão relacionadas com a importância das reflexões laterais para a criação de uma sensação tridimensional de espaço [24] e com a importância das baixas frequências na sensação do efeito espacial [25].

Virando as atenções para os executantes do espetáculo, existem algumas preocupações acústicas a ter em atenção que têm que ver com a facilidade de audição entre músicos e o com a capacidade de ouvirem o próprio instrumento. Uma orquestra terá problemas com reflexões tardias provenientes da parte traseira do palco e do teto. Portanto, os músicos devem estar o mais recuados possível de forma a maximizar o efeito de reflexões precoces das paredes circundantes. Os tetos de palco deverão estar a uma altura máxima de 8-10 metros para não permitirem reflexões tardias para os músicos. Vários patamares no palco são importantes para permitir serem criadas linhas de visão diretas do público com todos os músicos e promover a propagação direta [22].

3

ESTADO DA ARTE

3.1. ACÚSTICA DE AUDITÓRIOS – ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

No século IV a.C, na Grécia realizavam-se romarias em honra de Dioniso, deus do vinho e das festas, comemorando-o através de procissões com música e dança. As comemorações juntavam um grande número de pessoas que além de assistirem às procissões também participavam nelas. Os cortejos foram evoluindo para formas literárias mais bem organizadas conhecidas, atualmente, pelas tragédias (*Tragós*) e comédias gregas (*Komós*). Com a evolução dos textos, as durações dos espetáculos aumentaram e tornou-se necessário criar espaços para sentar o público e mantê-lo confortável. Nasceu, desta forma, o teatro na forma que o conhecemos atualmente, com uma reunião de um grande número de pessoas para assistirem a um espetáculo [26].

O interesse do público foi crescendo cada vez mais e na Grécia Antiga foram construídos vários teatros ao ar livre. A maior parte destes tinham lotação para cerca de cinco mil pessoas, mas teatros como o de Dioniso (Figura 3.1), em Atenas e o de Dódona, em Epiro contavam com dezassete e dezoito mil lugares, respetivamente. As arquibancadas eram construídas com recurso às montanhas e colinas existentes nesses espaços e procurava-se sempre localizar os teatros em sítios afastados de zonas ruidosas típicas do centro das cidades. Estes espaços eram conhecidos por permitirem que as pessoas sentadas nas partes superiores das arquibancadas ouvissem tão bem a voz dos executantes como as pessoas sentadas nas filas da frente. Este facto é resultado de um conjunto de condições: o silêncio do local onde os teatros eram construídos, orientação relativamente ao vento, a forte inclinação da arquibancada e a consequente boa linha de visão para o palco [27].



Figura 3.1 - Teatro de Dioniso, em Atenas [28].

Os teatros da Grécia Antiga eram constituídos por três zonas principais: a *Cávea* (plateia), a *Skéne* (palco-camarim) e a *Orkhestra* (onde atuavam os artistas) (Figura 3.2).

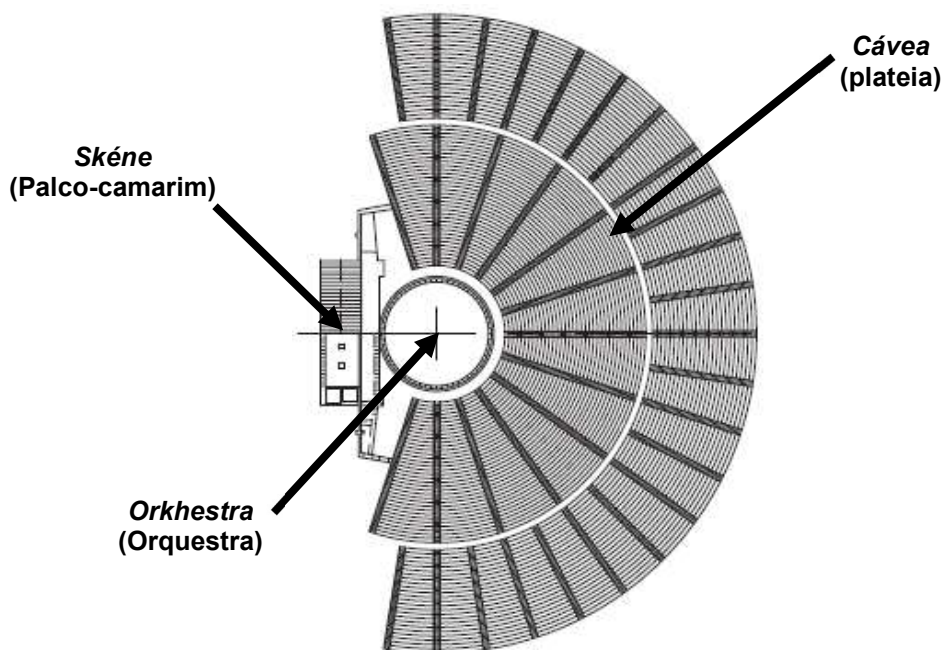


Figura 3.2 - Exemplo de um teatro clássico grego (*Anciente Theater at Epidauros*) [27].

À medida que o público aumentava, tornou-se necessário construir teatros cada vez maiores ou ampliá-los. Estas mudanças trouxeram o agravamento de problemas acústicos característicos de espaços ao ar livre. Com vista a levar a voz do palco até aos lugares mais afastados, foram criadas máscaras utilizadas pelos atores que tinham uma abertura em frente à boca em forma de funil, que originavam uma espécie de megafone interno [26]. Outro dos elementos importantes na continuidade da boa acústica, mesmo em teatros cada vez maiores, foi o uso de vasos ressonantes embutidos nos degraus da plateia. Estes ressoadores eram dimensionados de forma a conseguirem criar uma amplificação sonora de frequências importantes a serem ouvidas. Vitruvius, arquiteto e engenheiro romano, atribui aos vasos ressoantes uma parcela importantíssima na muito boa acústica dos teatros, dizendo: “*façam-se vasos de bronze proporcionais à grandeza do teatro, sejam fabricados de tal forma que, ao serem percutidos, possam fazer com que os sons musicais ressoem em sequência, de um intervalo de Quarta, passando pela Quinta, até chegar à Décima Sexta.*” [29].

Além da existência dos vasos ressoadores, outros elementos foram importantes na acústica destes espaços. A existência da *Skéne*, atrás do palco, que era construída em pedra, servia como uma grande superfície refletora que permitia aumentar o nível sonoro. Uma grande área de piso de pedra, na frente dos atores também foi criada para refletir para a audiência uma parte da energia da voz dos atores que ia para o piso. As arquibancadas curvadas também permitiam aproximar os espectadores do palco e desta forma evitar a perda de energia sonora com a distância, sendo que a grande inclinação destas assumia um papel de maior importância na receção do som (Figura 3.3) [26].

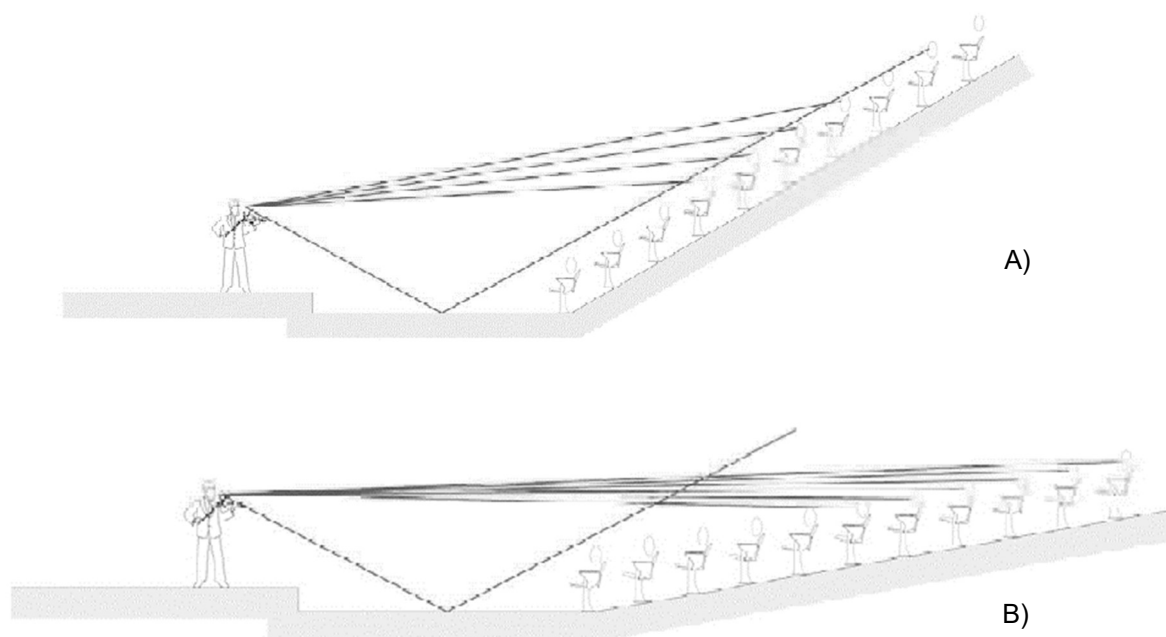


Figura 3.3 - A) Arquibancada íngreme, com o som direto e refletido a chegar a toda a plateia; B) Arquibancada pouco inclinada, com problemas na receção de som direto e refletido [30].

A cultura helenística, idealizada por Alexandre o Grande, tinha uma forte influência da cultura grega e trouxe novas ideias na forma de concepção de teatros. O teatro helénico tinha o palco mais elevado, o piso da área da orquestra era em pedra e possuía um aumento significativo da plateia comparando com o teatro clássico Grego [27].

Durante o Império Romano novos teatros foram construídos seguindo aproximadamente os modelos clássicos, sendo que enquanto os gregos usavam esses espaços especialmente para fins religiosos, os romanos utilizavam-nos para diversões pagãs (arenas de lutas). Ao contrário da construção Grega, os teatros romanos eram implantados nos centros das cidades e eram erguidos a partir do solo plano e não conforme a topografia do terreno. O arco formado pela plateia não excedia os 180° em volta do palco, que era nesta altura mais longo e onde as paredes envolventes eram da altura da *Cavea* proporcionando mais energia sonora para a audiência. Com o aumento dos espectadores, os arquitetos romanos viram-se na obrigação de conceberem espaços que conseguissem alojar um maior número de pessoas, portanto, recorreram a arenas de forma circular ou oval, como é exemplo, o conhecido Coliseu de Roma (Figura 3.4) [31]. Vitruvius, foi um importante estudioso das questões acústicas dos teatros e anfiteatros romanos, criando uma lista de regras de concepção de um bom espaço acústico defendendo a colocação de ressoadores nas arquibancadas [27].



Figura 3.4 - Coliseu de Roma [32].

Após a queda do Império Romano, a Europa entrou no período da Idade Média onde não existiram grandes avanços nos projetos de auditórios. No período Gótico, no início do século XI começaram a surgir grandes igrejas e catedrais no continente europeu com o principal objetivo de divulgar as doutrinas da Igreja. Tinham como características principais um grande volume devido e superfícies em pedra e alvenaria altamente refletoras. Esta excessiva reflexão criava problemas de sobreposição sonora que condicionava a inteligibilidade da palavra [27].

Apenas no século XV, em Itália no período renascentista surgiu um novo marco nos projetos de teatros e auditórios que se alastraram para outros países europeus. Foram herdadas muitas características que os teatros clássicos romanos possuíam. O plano de assentos era semielíptico e o palco mantinha a configuração. Ao redor da plateia era comum haver um pórtico de duas colunas com estátuas em cima (Figura 3.5). As paredes laterais proporcionavam reflexões benéficas e as galerias produziavam excelentes linhas de visão [27].



Figura 3.5 - Teatro renascentista [33].

O início do século XVII traz com ele um novo estilo artístico, conhecido como o Barroco. Na era barroca, a música instrumental erudita alcançou uma importância maior do que a música vocal feita até então. Os instrumentos musicais tornaram-se altamente sofisticados e com um patamar de perfeição no seu fabrico inigualável até aos dias de hoje. Devido ao crescente gosto por música erudita das famílias nobres e burguesas, foi necessário criar espaços fechados para plateias cada vez maiores. A elevada ornamentação dos espaços, característica desta época, foi um fator importante para uma boa difusão dos sons provenientes da orquestra para toda a plateia. No Norte da Europa, aquando da Reforma protestante e da posterior reação da Contra-Reforma, começou a dar-se especial atenção à palavra. O volume das igrejas foi reduzido de modo a diminuir o número de reflexões tardias que interferiam na inteligibilidade das palavras do orador. A posição do púlpito também foi modificada e colocada no centro da igreja com uma superfície difusora por cima para espalhar o som em várias direções. Os assentos também foram aproximados do púlpito e foram usadas cortinas suspensas de modo a reduzir os tempos de reverberação destes espaços [34].

O período Clássico inicia-se em meados do século XVIII e caracteriza-se, tanto no visual, como no desempenho, a um retorno ao espírito da Grécia e Roma antiga. Esta é uma época de grande evolução a nível de composições musicais e de preocupações acústicas crescentes de auditórios em espaços fechados. Foram inúmeros os compositores que nasceram musicalmente neste período, como por exemplo, Franz Joseph Haydn, Wolfgang A. Mozart e mais tarde Ludwig Beethoven. Nesta altura as

peças musicais eram escritas com muita atenção e de formas específicas tendo em atenção o desempenho da sala onde iriam ser tocadas. Até então, isto nunca tinha acontecido [27].

J.S. Bach e Giovanni Andrea Gallini uniram-se e forneceram financiamento para ser construído entre 1773 e 1775 uma sala de concertos, que se tornaria a mais conhecida de Londres, o *Hannover Square Room* (Figura 3.6) [34]. As salas desta altura eram relativamente pequenas rondando uma capacidade de 400 a 600 espectadores e onde os tempos de reverberação andavam na ordem dos 1,5 segundos. [Baganel e Wood, 1931]

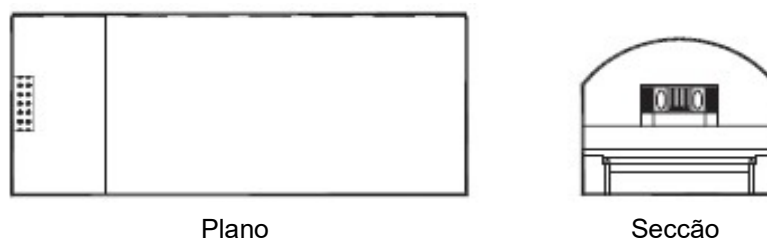


Figura 3.6 - *Hannover Square Room* (Londres) [34].

O período Romântico (1825-1900) facilmente se funde no período Clássico e foi também uma época de busca intensa pelo conhecimento acústico e de construção de novas salas para música. À medida que as orquestras iam crescendo, o incentivo à construção de grandes salas de concerto era cada vez maior. Tornava-se então necessário contornar as dificuldades impostas por grandes espaços que passavam pela excessiva reverberação consequente de reflexões demoradas [27].

A frustração de muitos arquitetos, nesta altura, é resumida nas palavras de Jean Louis Charles Garnier (projetista da Ópera de Paris): “*Eu me esforcei para dominar essa ciência bizarra [da acústica], mas... em nenhum lugar eu encontrei uma regra positiva para me guiar; pelo contrário, nada além de declarações contraditórias... Eu devo explicar que não adotei nenhum princípio, que o meu plano não se baseou em nenhuma teoria e que deixo o sucesso ou o fracasso ao acaso sozinho... como um acrobata que fecha os olhos e se apega às cordas de um balão ascendente.*” [35].

Mesmo apesar de toda esta frustração, as salas concebidas nesta altura estão entre as melhores já construídas. A maior parte são do tipo *caixa de sapatos* com tetos altos, várias superfícies difusas e uma capacidade de assentos relativamente baixa em relação às restantes salas construídas nesta altura. Estas salas proporcionavam excelente acústica e se tornaram exemplos a ser imitados na abordagem científica do desempenho de salas de concerto, no início do século seguinte [27].

O século XIX iniciou o estudo da acústica como uma ciência. A literatura foi crescendo através de livros e revistas técnicas, como por exemplo, o *Sensations of Tone* de Hermann von Helmholtz e o *Theory of Sound* de John W. Strutt (Lord Rayleigh) [27].

Durante esta época, na década de 1870, começou o desenvolvimento de dispositivos eletroacústicos. Ernst W. Siemens patenteou o transdutor de bobina móvel que levou ao aparecimento do altifalante e Alexander Graham Bell criou os primeiros microfones. Numa década, as indústrias de reprodução e gravação de música e cinema foram desenvolvidas ferozmente [27].

No final do século XIX e início do século XX, a teoria da acústica arquitetónica foi iniciada e estudada por W. C. Sabine. Desenvolveu a primeira teoria da deterioração do som nas salas em função da absorção sonora dos materiais criando uma fórmula que explicasse esse efeito, contando também com o parâmetro

do volume do espaço. Após esta descoberta, Sabine ajudou no projeto do *Boston Music Hall (Symphony Hall)*, que é ainda considerada uma das três melhores salas de concerto do mundo [27].

No século XX, o número de trabalhos publicados na área da acústica foi cada vez maior, aumentando o conhecimento. Mas, muitos dos princípios do projeto acústico nem sempre levaram a melhorias significativas de salas de concerto. Contudo, aspetos como o controlo de ruído de fundo e desenvolvimento de materiais acústicos, experimentaram grandes melhorias [27].

É também uma época de grande evolução tecnológica de ferramentas eletroacústicas que ajudam, nos dias de hoje, a ter uma melhor interpretação dos espaços através de uma maior precisão na medição de alguns parâmetros importantes e também de dispositivos que podem auxiliar na correção de alguns problemas ou défices acústicos em salas de espetáculo [27].

3.2. EXIGÊNCIA FUNCIONAIS DE AUDITÓRIOS

3.2.1. REGRAS GERAIS

W. C. Sabine dedicou-se seriamente à Acústica e tentou sempre procurar a interação entre a física e a arquitetura. Estudou como deviam ser concebidos espaços, de forma a que a música, palavra e sons fossem recebidos da melhor forma pelo público. Segundo ele, um auditório com qualidade acústica deverá seguir as seguintes regras básicas:

- O som deverá ter um nível sonoro aceitável;
- Um som complexo deverá manter as suas intensidades relativas;
- Os sons sucessivos em rápida articulação, seja no uso da palavra ou na música, deveria ser inteligíveis e claros, respetivamente, sendo facilmente diferenciados e independentes uns dos outros [36].

O nível sonoro depende da proximidade à fonte, pois este diminui com a distância. Esta não deverá ser superior a 20-25 metros entre o palco e a última fila do auditório. Uma solução para este problema em salas de grande audiência, será a criação de balcões ou o aumento da largura da sala que permitirá ao público manter uma distância aceitável em relação ao palco [2].

É também importante a questão da inclinação do plano dos assentos. Quanto mais inclinado for, melhor será a receção de ondas sonoras pois a influência dos espectadores na absorção da energia será reduzida. Portanto, uma inclinação considerável, fará com que zonas mais afastadas da fonte tenham boas condições de receção sonora [2].

A forma retangular foi, desde cedo, uma opção viável na qualidade acústica dos auditórios, devido à sua qualidade de distribuição de reflexões primárias laterais. É necessário, no entanto, perceber que se deve evitar uma forma precisamente paralelepípeda, pois esta pode levar ao aparecimento de alguns problemas de excesso de ressonância provocadas por ondas estacionárias, características deste tipo de auditórios. Portanto, paredes totalmente lisas e paralelas não são aconselháveis. Este paralelismo pode ser contornado através de painéis com superfícies irregulares e difusas, através de paredes convexas ou, então, recorrendo à colocação de material absorvente sonoro nessas áreas [2].

Outra das formas muito elogiada é a da sala em formato de hexágono alargado. Esta geometria é definida pela junção de auditório em forma de leque, com a forma de leque invertido. Esta configuração permite obter o melhor dessas duas formas e eliminar as desvantagens destas, se funcionassem isoladamente.

Salas em forma de leque são ótimas para possibilitar uma grande quantidade de público, com boa visibilidade, mas, pecam pela dificuldade de produzir primeiras reflexões laterais para o centro da plateia, que quanto mais afastada se encontra do palco, mais necessita de receção sonora que não seja de forma direta (Figura 3.7) [2].

A sala em forma de leque invertido tem a grande vantagem de conseguir produzir uma razoável quantidade de primeiras reflexões laterais por todo o auditório (Figura 3.8). Mas, em contrapartida é desconfortável visualmente em lugares da plateia [2].

A sala em forma de hexágono alargado permite, portanto, fazer uma distribuição mais uniforme de reflexões laterais por toda a sala e permitindo também uma boa visibilidade e conforto por parte do público na plateia (Figura 3.9) [2].

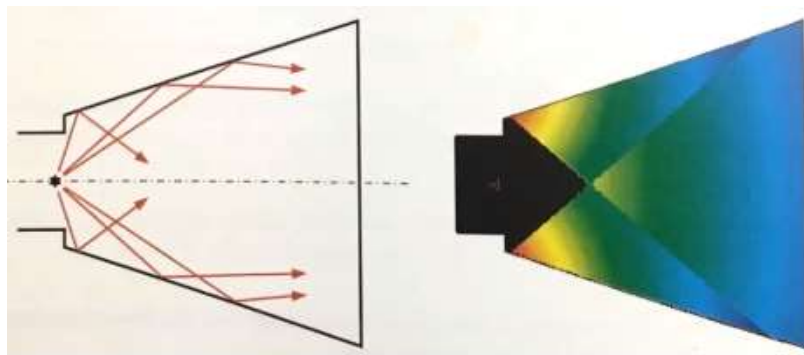


Figura 3.7 - Distribuição de reflexões laterais pela sala em forma de leque (Azul – poucas reflexões laterais; Laranja – muitas reflexões laterais) [37].

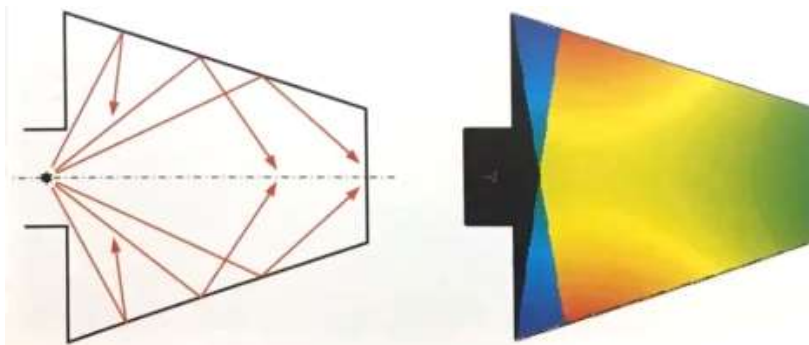


Figura 3.8 - Distribuição de reflexões laterais pela sala em forma de leque invertido (Azul - poucas reflexões; Laranja - muitas reflexões) [37].

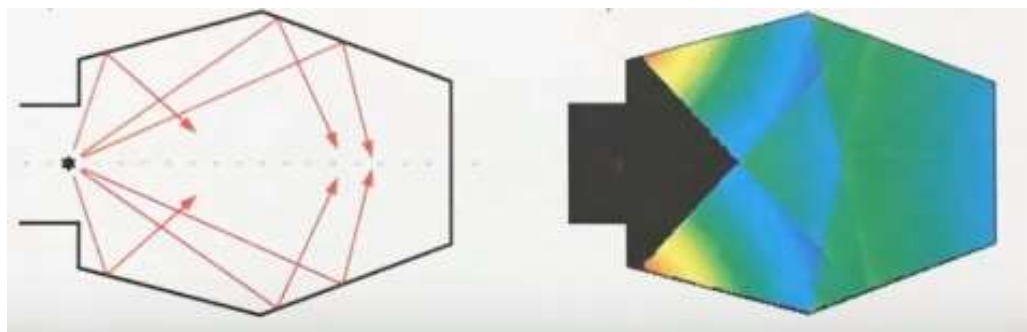


Figura 3.9 - Distribuição de reflexões laterais pela sala em forma de hexágono alargado (Azul - poucas reflexões; Laranja - muitas reflexões) [37].

As reflexões são necessárias para uma boa resposta acústica dos auditórios. As que chegam primeiro são cruciais na inteligibilidade da palavra e as tardias são importantes na percepção do espaço. Superfícies difusoras são essenciais para que a distribuição sonora através de reflexões seja eficaz em toda a plateia. A diferença no trajeto entre as ondas sonoras diretas e refletidas não deve ser superior a 17 metros. A altura do palco e respetivos painéis refletoras de teto devem também ser estudados de forma a controlar as reflexões tardias enviadas para os músicos. Tetos acima de 15 metros podem criar este tipo de problemas [38].

Um projeto acústico de um auditório deve ser concebido tendo em conta primeiramente um estudo de volumetria e geometria. A forma do auditório está diretamente ligada à qualidade acústica do espaço. Portanto deve sempre evitar-se projetar a forma e geometria do auditório sem antes saber qual a função para o qual esse espaço está destinado. Projetar o volume da sala de espetáculos não pode nunca ser desassociado da utilização que este terá no futuro. Para uso musical, é recomendado um volume mais significativo para ser possível uma reverberação maior. Pelo contrário, quando se pretende privilegiar a palavra, o volume deve ser reduzido [39].

A utilização de materiais e sistemas de absorção sonora deve ser pensada em situações em que seja necessário reduzir a reverberação do espaço. A absorção sonora, tal como o volume deve ser ajustada em função da utilização do auditório, conseguindo-se desta forma obter valores recomendados para o tempo de reverberação. A serem necessários materiais absorventes, estes devem ser primeiramente colocados nas paredes mais distantes do palco. Se essa área de absorção não for suficiente, deve ser colocado mais quantidade de material nas paredes laterais a partir do fundo do auditório e finalmente em superfícies do teto adjacentes às paredes laterais [39].

O ruído de fundo deve ser controlado de forma a não causar incomodidade na experiência dos espectadores. Ruídos incomodativos causados pela ventilação, canalizações e outros, devem ser isolados de forma a não interferirem na qualidade do espetáculo [2].

Outro dos aspetos a ter em atenção tem que ver com a escolha dos assentos para a plateia. A seleção do tipo de assentos deve ser muito bem estudada, pois esta representa uma grande área de absorção, principalmente, das altas frequências. Os valores recomendados da área e volume por cada assento, podem ser vistos no quadro 3.1 [40].

Quadro 3.1 - Área e volume recomendados por cada assento da plateia [40].

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

As pessoas sentadas na plateia funcionam como uma espécie de barreira para os demais sentados atrás dessas. Portanto, por razões acústicas como de visibilidade, os assentos devem ser dispostos de forma “alternada”, para que todos os espectadores, consigam ter uma boa visão para o palco e, consequentemente, receber o som direto com mais qualidade (Figura 3.10) [2].

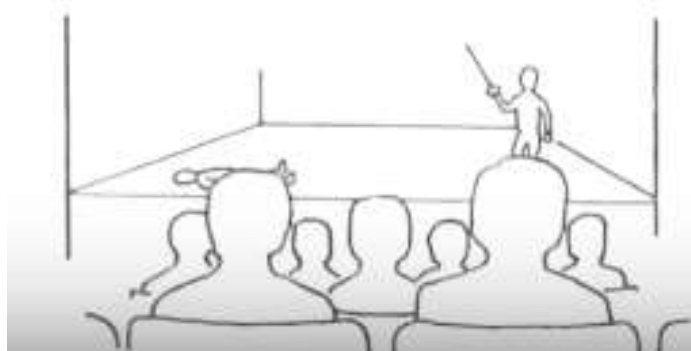


Figura 3.10 - Esquema representativo da colocação dos assentos de forma alternada entre os patamares [41].

Numa situação ideal, cada auditório deveria ser projetado e concebido apenas para uma única funcionalidade. Mas, esta situação é, em alguns casos, utópica devido à dispendiosidade e inviabilidade na construção de auditórios exclusivos para cada utilização. Nestes casos, torna-se necessário recorrer a projetos de acústica variável para que um mesmo auditório consiga ter uma resposta de qualidade em qualquer que seja a atividade praticada nesse espaço [1].

3.2.2. AUDITÓRIOS PARA PALAVRA

A situação da qualidade acústica de auditórios para a palavra é um pouco mais simples do que para a música. A busca pela inteligibilidade deve ser o objetivo principal neste tipo de espaços.

A inteligibilidade da palavra depende da relação entre a quantidade de energia sonora inicial e tardia que é recebida pelo ouvinte. Quanto maior for a energia sonora inicial captada, melhor será a acústica da sala. Por sinal, energia sonora tardia produz reverberação indesejada na percepção da palavra. Portanto, com vista a produzir uma maior quantidade de energia inicial, deve fazer-se chegar ao público ondas sonoras provenientes de som direto e de reflexões iniciais. Superfícies direcionadas para refletir ondas sonoras para a audiência mostram-se como uma boa solução na produção de reflexões iniciais [2].

Salas que através de superfícies refletoras conseguem produzir uma quantidade significativa de energia sonora inicial e que ao mesmo tempo possuem valores do tempo de reverberação curtos, conseguem comportar-se acusticamente bem [Barron]. Valores ideais de tempo de reverberação em espaços dedicados à palavra podem ir de 0,7 a 0,9 segundos, sendo que em espaços destinados a cinema o valor é alargado para de 0,8 a 1,0 segundos. O valor do parâmetro da Claridade (C_{80}) deverá ser maior que 6 dB para palavra (teatro e conferências) e maior que 5 dB para cinema [1].

Outro parâmetro que condiciona bastante a qualidade acústica de um auditório para palavra é o ruído de fundo, que se produzido com elevado nível de pressão sonora pode comprometer a inteligibilidade da sala. Este parâmetro é avaliado recorrendo a *curvas de incomodidade*, referidas na secção (2.4.3) [2].

3.2.3. AUDITÓRIOS PARA MÚSICA

O projeto de auditórios destinados a espetáculos de música assume uma maior complexidade em relação aos restantes. Para um bom comportamento acústico, destes espaços, é fundamental ser estudada uma série de fatores acústicos que noutro tipo de salas não eram tão importantes.

Salas de espetáculo necessitam de espaço para acomodarem grandes audiências que com elas arrastam problemas acústicos já bem conhecidos e referidos anteriormente. Outra das questões prende-se com o facto de estes auditórios terem de possuir um carácter polivalente para responderem acusticamente bem aos diferentes estilos de música. Por estas razões, a conceção de auditórios para espetáculos musicais torna-se um processo desafiante [2].

A reverberação assume um papel importante na vivacidade de um auditório. Baixas reverberações em salas de espetáculos de música conduzem a experiências pouco satisfatórias por parte do público. Geralmente um tempo de reverberação menor que 1,6 segundos, em frequências compreendidas entre 500 e 1000 Hz, pode levar a uma experiência musical desagradável [42].

A reverberância de baixas frequências é essencial na perceção de espaço causada nos espectadores e a sua relação com as médias frequências também é relevante. A sensação designada de *calor* de uma sala de espetáculos corresponde à razão entre o tempo de reverberação das baixas frequências em relação às médias frequências. Esta razão deverá ter valores aproximados de 1,25 para que a sala apresente resultados satisfatórios neste parâmetro subjetivo [2].

O tempo de reverberação é um parâmetro importante, mas não único a ter em conta num projeto de acústica de auditórios de música. É fundamental existir um equilíbrio em relação aos níveis de pressão sonora nas várias gamas de frequências. Um défice do nível de pressão sonora em algumas das frequências produzidas por determinados instrumentos (*coloração*) pode ser perturbador na apreciação de um espetáculo musical. A questão da difusão é também muito importante na medida em que campos sonoros difusos são essenciais neste tipo de auditórios para que haja uma distribuição uniforme do som por toda a plateia [42].

A *intimidade* (sensação auditiva de proximidade da fonte sonora) é um parâmetro subjetivo difícil de alcançar em auditórios de grande volume, como é comum em salas de espetáculos musicais. Este é condicionado pelo atraso da primeira reflexão em relação à receção do som direto. O intervalo de tempo entre estas duas ondas sonoras é responsável por criar, ou não, intimidade acústica no auditório, sendo

que esse valor não deve exceder os 20 milissegundos. Problemas relacionados com este parâmetro podem ser solucionados através da colocação adequada de superfícies refletoras [1].

Valores ideais de tempo de reverberação para cada tipo de estilo musical estão representados no quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Valores recomendados de tempo de reverberação para cada estilo musical [1].

Função	TR 500 -1000 Hz (s)
Música de câmara	1,4 - 1,7
Música sinfónica Barroca	1,4 - 1,6
Música sinfónica Clássica	1,6 - 1,8
Música sinfónica Romântica	1,9 - 2,2
Música sinfónica Moderna	1,4 - 1,9
Música popular	0,8 - 1,0
Música de órgão	2,5 - 3,5
Coros gregorianos	3 - 4

Sendo a Claridade (C_{80}) um parâmetro fundamental para a perceptibilidade de um espetáculo de música, é importante também limitar os seus valores dentro de cada estilo de música (Quadro 3.3).

Quadro 3.3 - Valores recomendados da Claridade (C_{80}) para cada estilo musical [1].

Função	C_{80} (dB)
Música de câmara	-1 a 1
Música sinfónica Barroca	0 a 2
Música sinfónica Clássica	-1 a 0
Música sinfónica Romântica	-2 a -1
Música sinfónica Moderna	-1 a 0
Música popular	> 6
Música de órgão	< -2
Coros gregorianos	-3 a -1

3.2.4. AUDITÓRIOS MULTIUSOS

Em auditórios concebidos para múltiplos fins, deverá sempre definir-se qual será a sua principal utilização para que se conceba um projeto acústico que beneficie mais essa atividade, mas tendo sempre em atenção as características importantes das restantes funcionalidades que a sala possa ter [2].

Um projeto de acústica variável é essencial neste tipo de auditórios e a versatilidade dos materiais no seu interior é de extrema importância para ir ao encontro das particularidades relevantes de cada tipo de utilização. Deve ser encontrado um ponto de equilíbrio entre os valores ideais das diferentes atividades para que se consiga obter um espaço funcional sem comprometer acusticamente nenhum tipo de espetáculo aí realizado [2].

A variabilidade dos valores do tempo de reverberação pode ser obtida através da variação do volume da sala (por exemplo, *Milton Keynes Theatre*, Inglaterra), da criação de câmaras reverberantes (por exemplo, *Lucern Concert*, Suíça), da variação da absorção sonora da sala com sistemas que permitam, por um lado ter-se materiais refletores ou difusos, e por outro, materiais absorventes (por exemplo, *Hong Kong Academy for Performing Arts*) [2].

Mudanças no volume da sala, em princípio, podem ser teoricamente mais atraentes, mas na prática são difíceis de incorporar num auditório funcional. Esta opção permite que haja pouca penalidade em termos da redução do nível da pressão sonora [2].

Quando se pretende variabilidade acústica através da variação da absorção sonora da sala, são necessárias grandes áreas de materiais com superfícies absorventes, para se conseguir ter efeitos significativos na modificação dos valores do tempo de reverberação. A introdução de materiais com elevada absorção sonora é a abordagem mais simples, mas deve ter-se em consideração o facto de que esta solução pode trazer complicações na redução do nível de pressão sonora. Cortinas absorventes sobre secções de paredes laterais podem ser um dos sistemas utilizados para obter variabilidade na absorção sonora da sala, tendo em atenção que estas não anulem completamente as benéficas reflexões laterais [2].

Pode obter-se também variabilidade acústica através da utilização de refletores móveis usados, por exemplo, no *Queen Elizabeth Hall* em Londres. Para atividades que privilegiem a *palavra* pode ter-se painéis menores, visto que são utilizadas frequências maioritariamente altas. A audição de ondas sonoras de baixas frequências importantes, por exemplo, na música, obriga à utilização de painéis com maiores dimensões. Para que o impacto da utilização de superfícies refletoras seja significativo, é necessária mais do que uma reflexão adicional. Pode pensar-se na utilização de painéis refletores móveis articulados que fornecessem assistência de diferentes formas para a *palavra* e para a música [2].

Uma variação na difusão da sala pode também oferecer variabilidade acústica, por exemplo, através de um teto horizontal que pode transformar-se numa superfície difusa com ripas e fendas. Porém, a mudança no grau de dispersão carrega menos impacto do que uma mudança na absorção sonora do auditório. São necessárias grandes áreas que possam ser alteradas para que o efeito seja significativo [2].

Cavanaugh defendia que o tempo de reverberação neste tipo de auditórios deveria estar compreendido entre 1,4 e 1,9 segundos [43].

3.3. LEGISLAÇÃO PORTUGUESA

3.3.1. INTRODUÇÃO

O *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE)* instituído inicialmente pelo *DL 129/2002 de 1/5* e depois significativamente alterado pelo *DL 95/2019*, está em vigor, nesta nova versão, desde 18/07/2019 e aplica-se às seguintes tipologias de edifícios:

- Habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras;
- Comerciais e de serviços, e partes similares em edifícios industriais;
- Escolares e similares, e de investigação;
- Hospitalares e similares;

- Recintos desportivos;
- Estações de transporte de passageiros;
- Auditórios e salas [44].

O *RRAE* tem como objetivo controlar alguns parâmetros que possam interferir no conforto e na qualidade do ambiente acústico que condicionem o bem-estar das populações. O cumprimento desses parâmetros deve ser realizado não só no projeto, mas também na construção dos edifícios. Os projetos de condicionamento acústico devem ser concebidos por técnicos qualificados, ou seja, por engenheiros especializados em engenharia acústica outorgada pela Ordem dos Engenheiros, ou então, por pessoas que tenham recebido qualificação adequada na área da acústica de edifícios reconhecida, obviamente, pelas respetivas ordens ou associações profissionais [1].

3.3.2. ISOLAMENTO A RUÍDOS AÉREOS

Segundo o *artigo 10º - A (Auditórios e Salas), alínea 3 do RRAE*, o isolamento sonoro das fachadas de auditórios, $D_{2m,nT,w}$, corrigido do termo de adaptação aplicável C (ruído rosa) e C_{tr} (ruído de tráfego), deve ser o necessário para que o nível sonoro contínuo equivalente do ruído ambiente no interior, determinado a partir da média espacial de pontos representativos, na ausência de funcionamento das instalações técnicas do edifício, L_{Aeq} (3.1), satisfaça o seguinte: $L_{Aeq} \geq 30$ dB (A) associado a um fator de incerteza, I , de 3 dB.

$$L_{Aeq} = 10 \log \left[\left(\frac{1}{T} \right) \sum_{i=1}^N t_i \cdot 10^{\frac{L_i}{10}} \right] \quad (dB) \quad (3.1)$$

Sendo,

T – tempo total de funcionamento de todas as fontes sonoras (s);

t_i – tempo de funcionamento de cada uma das fontes sonoras (s);

L_i – nível de pressão sonora de cada fonte (dB (A))

Este requisito é aplicável aos recintos que constituem o uso principal do edifício em que se inserem e aos que se integram em edifícios com outros usos [44].

3.3.3. RUÍDOS CAUSADOS POR EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES TÉCNICAS

Segundo o *artigo 10º - A (Auditórios e Salas), alínea 5 do RRAE*, no interior dos recintos, o nível sonoro contínuo equivalente do ruído partículas, L_{Aeq} (3.1), associado ao funcionamento dos equipamentos e instalações técnicas, designadamente de instalações de aquecimento, ventilação e ar condicionado, deve, com a sala desocupada, satisfazer o seguinte:

- $L_{Aeq} \leq 38$ dB (A), no caso de cinemas associado a um fator de incerteza, I , de 3 dB;
- $L_{Aeq} \leq 30$ dB (A), nos restantes recintos associado a um fator de incerteza, I , de 3 dB.

Este requisito é aplicável aos recintos que constituem o uso principal do edifício em que se inserem e aos que se integram em edifícios com outros usos [44].

3.3.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O tempo de reverberação médio, T , é medido nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz. Considera-se esta medição quando as salas se encontram normalmente mobiladas e sem ocupação, devendo satisfazer os seguintes valores:

- Para volumes, V , inferiores a 250 m^3 , $T \leq 0,12 V^{1/3}$, associado a uma incerteza de 25%;
- Para volumes, V , entre 250 e 9000 m^3 , $T \leq 0,31 + 0,17 \log V$ associado a uma incerteza de 35%;
- Para volumes, V , superiores a 9000 m^3 , $T \leq 0,05 V^{1/3}$ associado a uma incerteza de 40% [44].

4

CINETEATRO DE ESMORIZ

4.1. PASSADO HISTÓRICO

O cineteatro *Esmoriztur* é, na sua generalidade, um espaço cultural situado na Avenida da Praia, 472, na freguesia de Esmoriz, pertencente à Câmara Municipal de Ovar (Figura 4.1). Encontra-se atualmente desativado e a sofrer obras de intervenção e requalificação integral, na ordem dos 1,5 milhões de euros com o objetivo de criar uma sala para cinema, teatro, conferências e espetáculos musicais, bem como manter o espaço, atualmente utilizado para uma loja do cidadão.



Figura 4.1 - Cineteatro *Esmoriztur* em Esmoriz [45].

Este espaço foi inaugurado em 1950 e viveu tempos de glória durante a década de 1980, chegando a ser catalogada como uma das mais importantes salas do norte do país. Por este local passaram grandes nomes da música como, Amália Rodrigues e Carlos do Carmo, além de importantes peças de teatro da época e outro tipo de espetáculos. Foi considerado, até aos anos 1990, um grande pólo cultural que serviu como ponto de encontro para muitos esmorizenses. Desde então, o edifício encontrava-se em processo de degradação e de vandalização. Espera-se que com as obras de requalificação este espaço volte a ter a importância cultural que teve noutros tempos [45].

4.2. CARACTERIZAÇÃO

O auditório do cineteatro de Esmoriz encontra-se no interior de um edifício que terá espaços na sua envolvente destinados a outros tipos de valências. Na figura 4.2 é apresentado todo o edifício em planta, em situação futura, onde é possível verificar a existência do auditório no centro e os restantes espaços na envolvente, sendo que a disposição anterior do edifício, antes da eminente intervenção, já teria esta configuração.

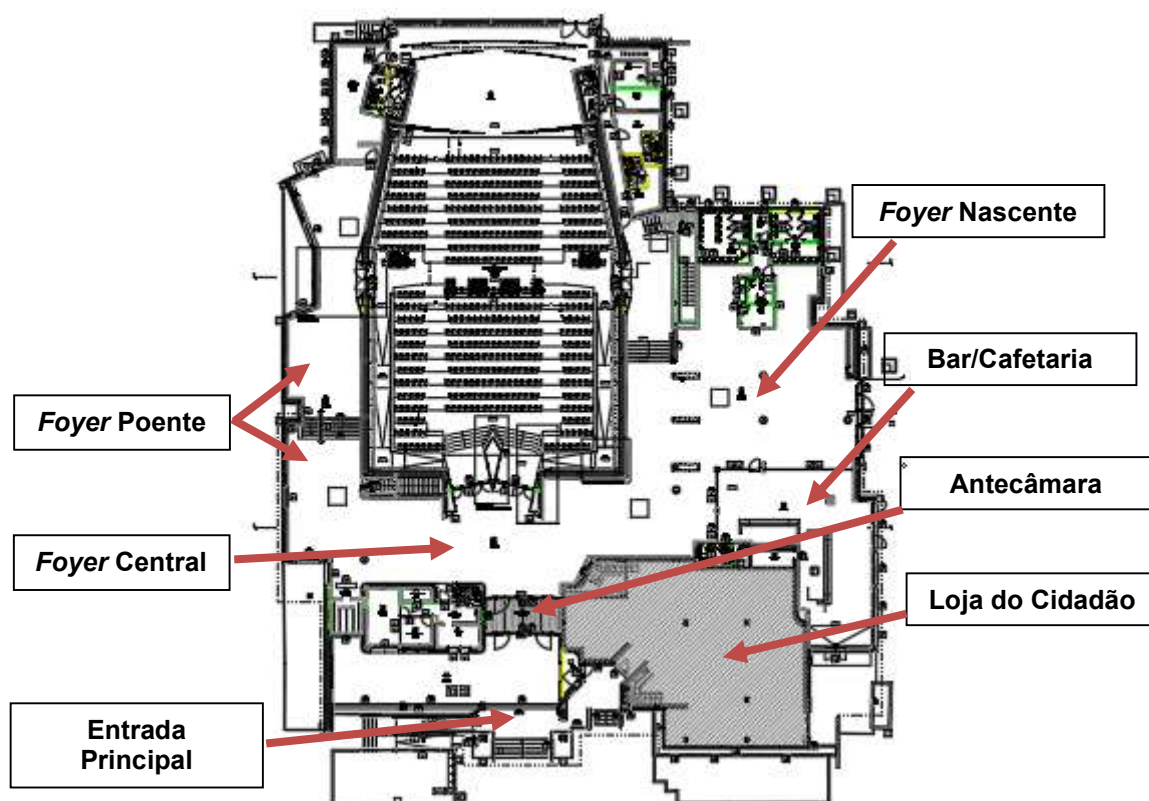


Figura 4.2 – Planta do piso 0 do cineteatro *Esmoriztur* na situação futura.

A entrada principal situa-se na área mais a sul, onde haverá uma zona administrativa, um bengaleiro, um espaço para bilheteiras e uma antecâmara de acesso ao *foyer* central do edifício. A sul do edifício também ficará localizada a já existente *loja do cidadão* que terá um funcionamento independente do resto das valências em funcionamento neste espaço.

O *foyer* central de 276 m², o nascente de 328 m² e o poente de 160 m², perfazem uma área total de 764 m² de espaço livre na envolvente do auditório. Estas três zonas, face às suas significativas dimensões, poderão albergar exposições e outro tipo de acontecimentos culturais, como, pequenos concertos ou apresentações. Serão um espaço que poderão possuir uma versatilidade de usos permitindo implementar diversas configurações espaciais.

Junto ao *foyer* nascente, haverá um espaço dedicado a uma bar/cafetaria que terá acesso pelo interior do edifício, mas que pode também funcionar como um espaço autónomo com ligação ao exterior. Sabendo que os *foyers* serão também utilizados como espaços culturais, terá de existir uma atenção especial nos ruídos causados pelos equipamentos em funcionamento no bar.

A norte do edifício existirá outra entrada, mas apenas para cargas e descargas de material cénico e equipamentos necessários para a realização de espetáculos, que podem ser colocados e organizados num espaço próprio, localizado nas traseiras do palco. Será também o local de entrada de artistas, que farão parte da atuação, para o acesso ao *backstage* (Figura 4.3).

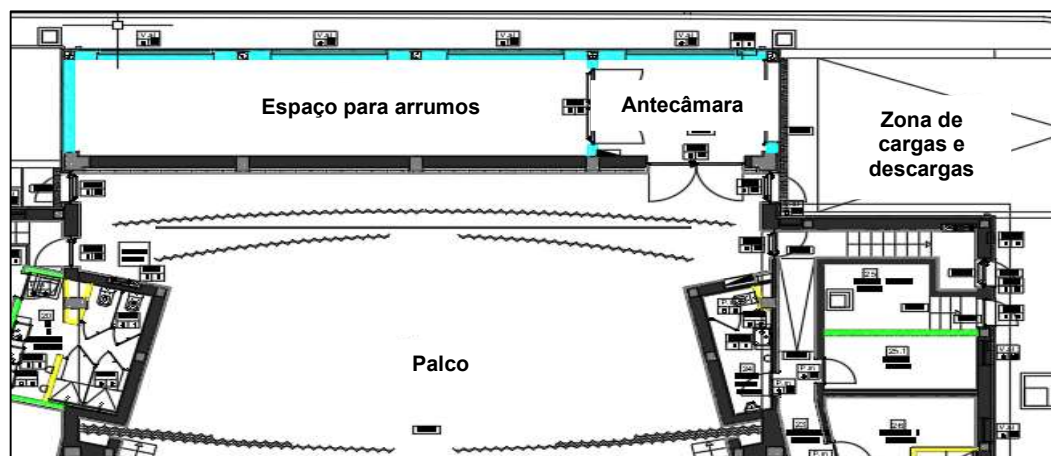


Figura 4.3 - Entrada Norte do edifício, piso 0 (zona de cargas e descargas).

A zona envolvente do auditório será composta por camarins e arrumos em ambos os lados. Existem também instalações sanitárias em áreas adjacentes ao palco, apenas separadas por uma parede lateral, pelo que é necessário estudar que implicações pode causar o funcionamento destas no comportamento acústico do auditório, mais concretamente na zona do palco (Figura 4.4).

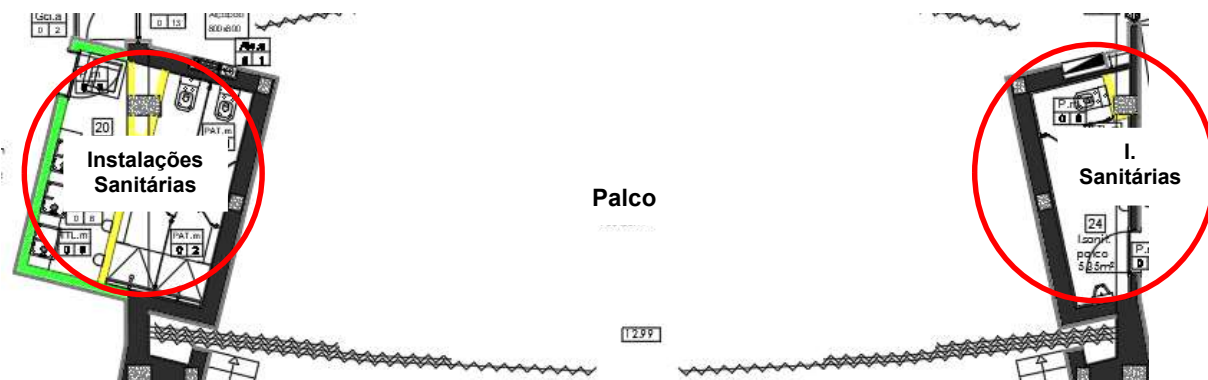


Figura 4.4 – Cineteatro de Esmoriz (situação futura), com instalações sanitárias localizadas em espaços adjacentes ao palco, piso 0.

O auditório com uma área de 583 m², terá a capacidade de sentar confortavelmente 525 pessoas e 10 com mobilidade condicionada. A primeira fila de assentos da plateia está colocada a cerca de 6 metros do centro do palco, sendo que os lugares mais afastados se encontram a 30 metros. A zona do palco tem uma área de 156 m² e encontra-se elevado de 0,87 metros em relação à cota onde assentam os lugares mais próximos, e mais baixo 2,30 metros em relação à última fila. Neste auditório não existe caixa de palco, ou seja, a cota do teto é constante em todo o auditório, pelo que não existem espaços acoplados.

Haverá também uma cabine de som/projeção conectada à sala de espetáculos, situada num piso superior com acesso através de uma caixa de escadas a partir do *foyer* poente.

A forma geométrica do auditório é composta por um retângulo na parte superior, com paredes laterais paralelas, e por um trapézio na zona junto ao palco, com paredes laterais enviesadas. O acesso pelo público ao auditório poderá ser feito através da entrada principal situada no topo do auditório. Nas figuras 4.5 e 4.6 estão representados a planta e um corte transversal do auditório, respetivamente.

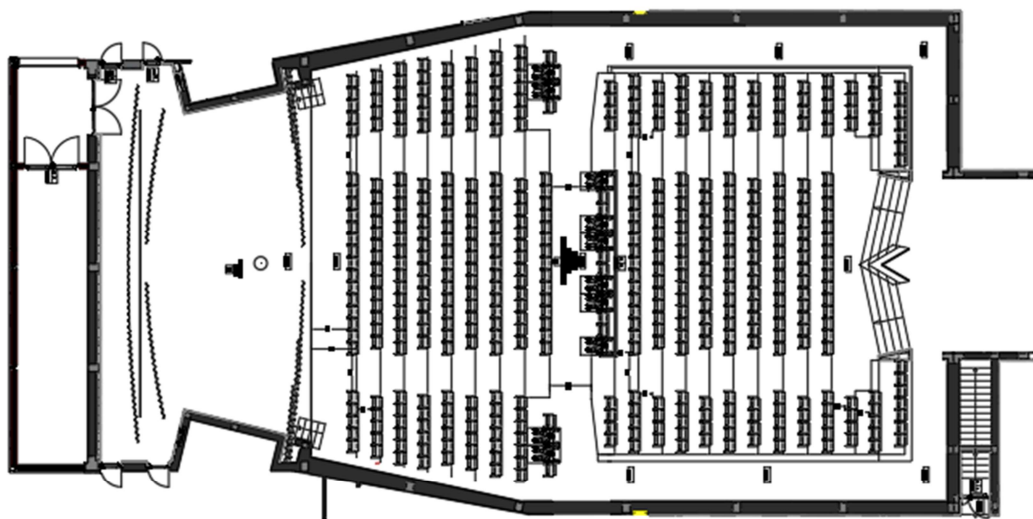


Figura 4.5 – Cineteatro de Esmoriz - planta do espaço do auditório (situação futura, piso 0).

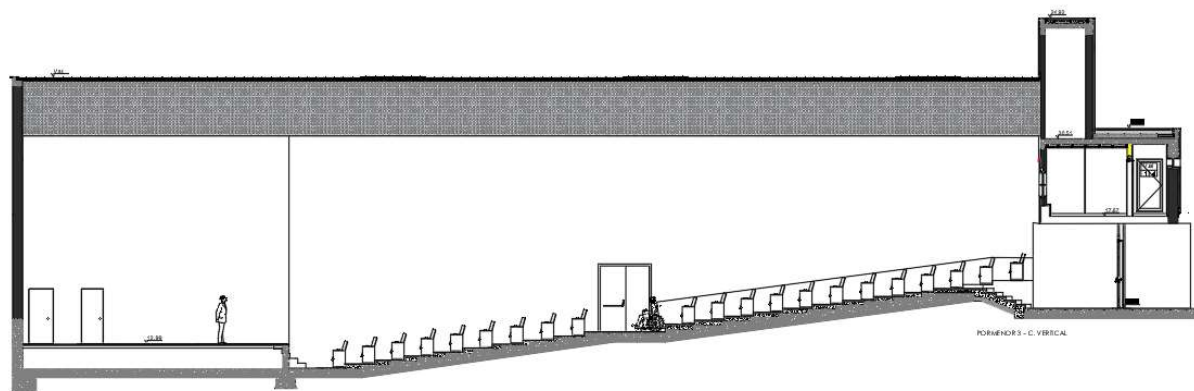


Figura 4.6 – Cineteatro de Esmoriz - corte transversal do espaço do auditório (situação futura, piso 0).

O teto do auditório não estará completamente livre devido à colocação de condutas de ar para o sistema de ventilação que serão colocadas a uma cota de aproximadamente 2,0 metros a partir do teto.

O pavimento do auditório encontra-se atualmente em betão, e as paredes são constituídas por alvenaria de tijolo rebocadas e pintadas. A cobertura é composta por painéis pré-fabricados em sanduíche em chapa de aço galvanizado termo-lacada em ambas as faces. Na zona do palco, o pavimento é composto por um pavimento flutuante em soalho.

A inclinação da plateia é constante em toda a sala com um valor de 8° , sendo que a diferença de cotas entre patamares de cada fila de assentos é de 14,5 centímetros.

O volume da zona do palco é de 1970 m^3 , enquanto que da plateia é de 6604 m^3 , o que perfaz um total aproximado de 8574 m^3 , considerando apenas o “esqueleto” do auditório, completamente vazio, sem material cénico, assentos e outros tipos de materiais.

As figuras 4.7 e 4.8 mostram o interior do auditório do cineteatro de Esmoriz onde é possível verificar a existência da estrutura metálica no teto que serve de suporte às condutas de ventilação. Na figura 4.7, observa-se a entrada principal, no topo do auditório e na figura 5.8 a zona do palco, ao fundo.



Figura 4.7 - Interior do auditório do cineteatro de Esmoriz (foto tirada a partir do palco). [Foto de autor]



Figura 4.8 - Interior do auditório do cineteatro de Esmoriz (foto tirada a partir do topo do auditório). [Foto de autor]

5

MEDIÇÕES ACÚSTICAS

5.1. METODOLOGIA

Para a elaboração de um projeto de reabilitação de uma sala com acústica variável, torna-se imprescindível avaliar o tempo de reverberação do auditório na sua forma e estado inicial, para perceber de que forma se pode moldar o espaço e ir ao encontro dos valores recomendados para cada utilização da sala. As medições foram realizadas com a sala no estado “antigo”, completamente vazia (e já sem cadeiras) sendo que as entradas para o auditório já não tinham qualquer tipo de porta, estando, pois, abertas e sob a influência da absorção sonora do ar.

A medição do tempo de reverberação foi realizada ao abrigo da norma NP EN ISO 3382-2 - *Medição de parâmetros de acústica de salas* que descreve o procedimento de medição, o equipamento necessário, o número de pontos de medição requerido e a metodologia de processamento dos dados e apresentação do relatório de ensaio.

O equipamento usado para a medição do tempo de reverberação (*TR*) foi o sonómetro da marca *Brüel & Kjær*, modelo 2260 e uma fonte sonora também da marca *Brüel & Kjær*, modelo 4224 (Figura 5.1). O sonómetro funcionava como recetor de sinal, registando os diferentes tempos de reverberação nas frequências de 1/3 de oitava emitidas de 100 a 5000 Hz. A fonte sonora, através da utilização de um adaptador em forma de “funil” colocado na frente do amplificador, conseguia tornar a emissão do som mais difusa por todo o auditório.



Figura 5.1 - Equipamento utilizado na medição do tempo de reverberação no auditório do cineteatro de Esmoriz (à esquerda, o sonómetro *B&K2260* e à direita a fonte sonora *B&K4224*) [Fotos de Autor].

A medição do tempo de reverberação pelo sonómetro, é feita para um decaimento de 30 dB e posteriormente, de forma automática, é extrapolado, através do declive da reta, para um decaimento de 60 dB (TR_{30}), sendo este o valor para cálculo e análise à legislação. O decaimento de 60 dB não é medido de forma direta, devido à possível sobreposição que o ruído de fundo possa ter antes da extinção do som emitido pela fonte sonora.

Para a medição do TR , foi emitido, pela fonte sonora, um ruído branco que foi posteriormente recebido pelo sonómetro, avaliando o decaimento deste ao longo do tempo.

Para ter uma avaliação mais rigorosa da reverberação, realizou-se a medição do TR em quatro pontos diferentes do auditório, mais concretamente, uma no palco e as restantes três na plateia (Figura 5.2). O ponto 1 localizou-se no ponto central do palco, o ponto 2 foi colocado na extremidade inferior, o ponto 3 no centro da plateia e o ponto 4 na extremidade superior.

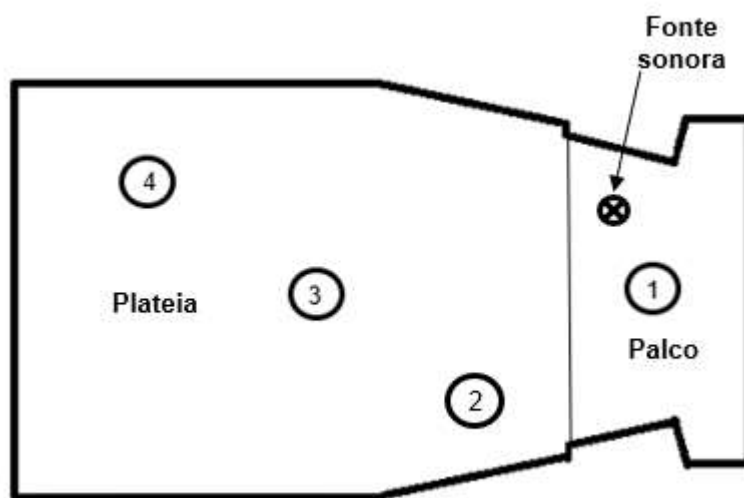


Figura 5.2 - Pontos do auditório do cineteatro de Esmoriz onde foi medido o tempo de reverberação [Esquema do autor].

O sonómetro foi colocado nesses pontos em cima de um tripé a uma altura aproximada de 1,0 metro, simulando desta forma a posição de um espectador no auditório. A fonte sonora foi colocada num único ponto para todas as medições, nomeadamente no palco, inclinada a 45° com o piso.

Estando este edifício (*Esmoriztur*) em obras de requalificação, foi necessário, em concordância com a empresa responsável, estabelecer o horário mais indicado para se procederem às medições do tempo de reverberação. Para que não houvesse qualquer condicionamento por parte da equipa de trabalho em obra, nem interferência nos resultados, foi decidido realizar as medições após a hora do término dos trabalhos (entre as 17h15 e as 18h20 no dia 4 de fevereiro de 2020) para se conseguir o maior silêncio possível dentro do auditório.

5.2. RESULTADOS

A medição foi realizada a uma temperatura ambiente de 16 °C e uma humidade relativa de 54% e obtiveram-se os valores do tempo de reverberação dos quatro pontos nas diferentes bandas de 1/3 de oitava, apresentados no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Resultado das medições do tempo de reverberação no auditório do cineteatro de Esmoriz (situação atual, sem cadeiras) em segundos, nas diferentes bandas de frequência de 1/3 de oitava.

Frequência (Hz)	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	TR (s) médio
100	1,91	2,72	2,09	4,11	2,71
125	1,34	1,52	1,56	1,86	1,57
160	1,30	2,49	1,74	1,34	1,72
200	1,47	2,20	1,71	1,44	1,71
250	1,47	1,52	1,68	1,59	1,57
315	1,46	1,48	1,73	1,72	1,60
400	1,45	1,40	1,56	1,72	1,53
500	1,59	1,61	1,78	1,68	1,67
630	1,63	1,49	1,78	1,54	1,61
800	1,66	1,56	1,65	1,95	1,71
1000	1,49	1,84	1,92	2,02	1,82
1250	1,57	1,79	1,86	1,97	1,80
1600	1,71	1,84	1,92	2,20	1,92
2000	1,75	1,88	1,90	2,22	1,94
2500	1,64	1,85	1,85	2,01	1,84
3150	1,63	1,71	1,82	1,94	1,78
4000	1,54	1,62	1,65	1,78	1,65
5000	1,41	1,45	1,63	1,61	1,53

Para efeitos de cálculo e de cumprimento da legislação, torna-se mais interessante obter valores do tempo de reverberação associados a frequências em bandas de uma oitava. Esse valor obtém-se fazendo a média aritmética das três bandas de frequência de 1/3 de oitava, conseguindo-se desta forma chegar aos valores do Quadro 5.2.

Quadro 5.2 - Valores do tempo de reverberação em função das frequências por banda de 1/1 oitava no auditório do cineteatro de Esmoriz (situação atual, sem cadeiras).

Frequência (Hz)	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	TR (s) médio
125	1,52	2,24	1,80	2,44	2,00
250	1,47	1,73	1,71	1,58	1,62
500	1,56	1,50	1,71	1,65	1,60
1000	1,57	1,73	1,81	1,98	1,77
2000	1,70	1,86	1,89	2,14	1,90
4000	1,53	1,59	1,70	1,78	1,65

É possível verificar um valor mais elevado no tempo de reverberação associado à frequência de 1/1 oitava de 125 Hz, em todos os pontos de medição. Este valor pode ser talvez explicado pelo facto da cobertura do auditório ou das condutas do sistema de ventilação entrarem em excitação nesta baixa frequência e pela pouca absorção sonora do ar nessa banda de frequência.

Ao abrigo do *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE)*, artigo 10º, alínea 1a), o tempo de reverberação médio obtém-se através da média aritmética dos valores de *TR* nas bandas de

oitava centradas nas frequências de 500, 1k e 2k Hz (5.1). Os valores deste parâmetro encontram-se calculados na figura 5.3.

$$TR_{\text{médio}} = \frac{TR(500\text{Hz}) + TR(1000\text{Hz}) + TR(2000\text{Hz})}{3} \quad (s) \quad (5.1)$$

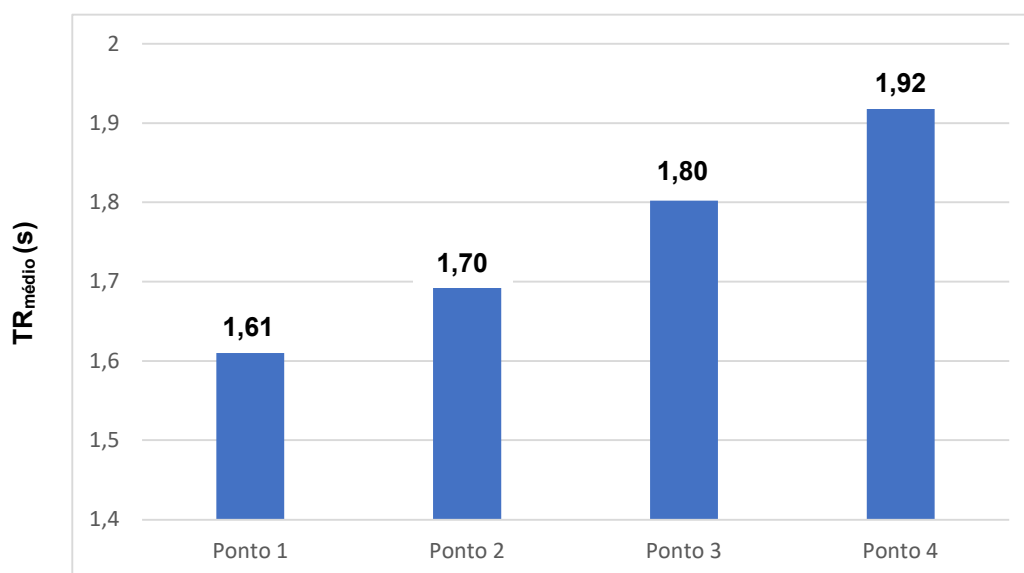


Figura 5.3 - Valores do tempo de reverberação médio (500/1k/2k Hz) nos quatro pontos de medição no auditório do cineteatro de Esmoriz (situação atual, sem cadeiras).

Pela análise da figura 5.3 verifica-se que os valores de TR mais significativos são registados no ponto 4. Este facto pode ser explicado devido à existência de paredes laterais, nesse local, serem paralelas e não terem qualquer tipo de tratamento acústico, sendo apenas superfícies lisas, favoráveis à ocorrência do fenómeno de ecos repetidos (*flutter echo*) (Figura 5.2).

Fazendo a média dos valores do tempo de reverberação dos quatros locais de medição, obtém-se o valor de TR global do auditório de cerca de 1,8 segundos. Este valor é obtido através das medições em que, como já foi referido, existiam áreas abertas nas quais existiu interferência da absorção do ar nos resultados (e sem cadeiras).

Com vista a conseguir obter os valores previsíveis do tempo de reverberação mais aproximados da situação real do auditório vazio, mas com cadeiras e fechado (no espaço agora sem portas / aberto), recorreu-se à *fórmula de Sabine*. Sabendo que o volume do auditório era de 8574 m³, foi necessário calcular a área total das aberturas (onde estavam portas). A entrada principal com dimensões (8,68 x 2,87 m) e as aberturas laterais com (3,16 x 3,17 m) e as de palco com 10,30 m², perfazem um total de espaço aberto de 55,24 m². Para efeitos do cálculo, foi escolhido “preencher” essa área com alvenaria de tijolo rebocada em seguimento das paredes já existentes, com os coeficientes de absorção sonora indicados no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 - Coeficientes de absorção sonora, em função da frequência, de uma parede de alvenaria em tijolo rebocada [46].

Bandas de Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficiente de absorção sonora (α)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03

Em relação às futuras cadeiras na sala, estas encontrar-se-ão agrupadas, pelo que o valor da absorção sonora equivalente desta parcela obtém-se multiplicando o coeficiente de absorção sonora referente ao tipo de cadeira pela área de pavimento da audiência que, neste caso, era de 306 m². O tipo de cadeira escolhida pelo Dono de Obra foi o modelo *NUS*, da marca *EuroSeating* (Figura 5.4).

Os coeficientes de absorção sonora, por banda de frequência, associados a esta cadeira ocupada são apresentados no Quadro 5.4.

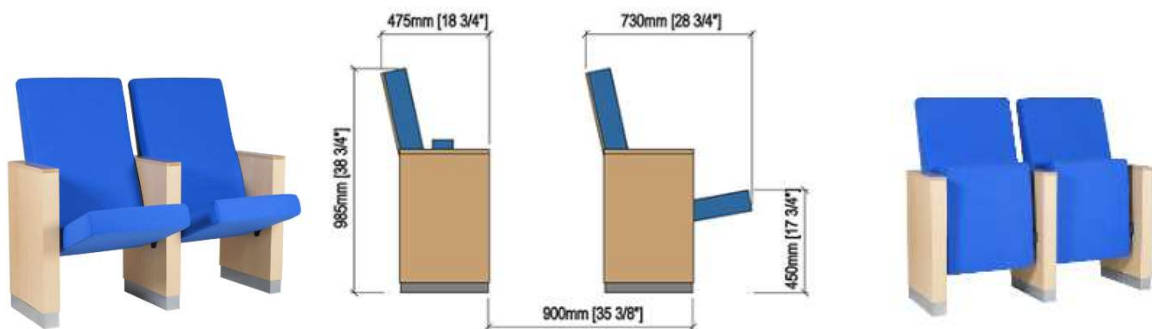


Figura 5.4 - Cadeira escolhida para colocar no auditório do cineteatro de Esmoriz (modelo *NUS* da marca *EuroSeating*) [47].

Quadro 5.4 - Coeficientes de absorção sonora da cadeira *NUS* ocupada, por banda de frequência de 1/1 oitava. [47]

Bandas de Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficiente de absorção sonora (α)	0,41	0,62	0,79	0,88	0,86	0,85

Sabendo a média dos valores dos tempos de reverberação dos quatro pontos da sala completamente vazia (à exceção das condutas de AVAC) e com os espaços abertos referidos anteriormente, consegue-se calcular a absorção sonora equivalente (A') correspondente a cada banda de frequência de 1/1 oitava e contendo já a parcela da absorção sonora do ar, através da *fórmula de Sabine* que assume a seguinte forma:

$$TR = \frac{0,16 * 8574}{A'} \quad (s) \quad (5.2)$$

Desta forma, consegue-se obter os valores da absorção sonora equivalente, apresentados no quadro 5.5.

Quadro 5.5 - Absorção sonora equivalente (A') das superfícies do auditório vazio (à exceção das condutas de AVAC) e com aberturas na zona das portas (incluindo o efeito do volume de ar).

Frequência (Hz)	TR (s)	A' (m2)
125	2,00	685,92
250	1,62	846,82
500	1,60	857,40
1000	1,77	775,05
2000	1,90	722,02
4000	1,65	831,42

Sabendo o valor da absorção sonora equivalente de toda a envolvente ao espaço do auditório incluindo o efeito do ar (A'), através da fórmula (5.3), consegue-se obter os previsíveis valores “reais” do tempo de reverberação da “futura” sala vazia (à exceção das cadeiras e condutas de AVAC) e completamente fechada, sem qualquer abertura. A área correspondente às aberturas é de 55,24 m² e a correspondente à área das cadeiras da plateia é de 306 m².

$$TR = \frac{0,16 * 8574}{A' + (\alpha_{alvenaria} - \alpha_{ar}) * S_{aberturas} + (\alpha_{cadeiras} - \alpha_{betão}) * S_{cadeiras}} \quad (s) \quad (5.3)$$

Sendo, que o valor da absorção sonora do ar (α_{ar}) é igual a 1,0 e que os coeficientes de absorção sonora do betão são os que estão apresentados no quadro 5.6.

Quadro 5.6 - Coeficientes de absorção sonora de um pavimento em betão, por banda de frequência de 1/1 oitava [1].

Bandas de Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficiente de absorção sonora (α)	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02

O novo cálculo do tempo de reverberação (sala “futura” com cadeiras e sem aberturas) foi feito para as bandas de frequência de 1/1 oitava (125 a 4000 Hz), obtendo-se os resultados apresentados no quadro 5.7.

Quadro 5.7 - Valores previsíveis do tempo de reverberação no auditório (futuro) do cineteatro de Esmoriz em função da frequência por bandas de 1/1 oitava, com este completamente fechado e com a existência de cadeiras ocupadas.

Banda de Frequência (Hz)	TR (corrigido) (s)
125	1,82
250	1,40
500	1,32
1000	1,39
2000	1,48
4000	1,33

Novamente, ao abrigo do *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE)*, artigo 10º, alínea 1a), o tempo de reverberação de um espaço obtém-se através da média aritmética dos valores de TR para as frequências de 500, 1k e 2k Hz (6.1). Com a correção dos tempos de reverberação da sala, obtemos então um valor médio de TR igual a cerca de 1,4 segundos.

Um valor do tempo de reverberação de 1,4 segundos, num auditório, seria ótimo para espetáculos de *Ópera (não wagneriana)*, de música de *Câmara* e para alguns estilos musicais sinfónicos como música *Barroca* e *Moderna*, mas seria um valor inadequado para atividades que privilegiem a *palavra*, para *Cinema*, para música sinfónica *Clássica* e *Romântica*, música popular, de órgão e coros gregorianos.

6

PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO NO PROJETO

6.1. CORREÇÃO ACÚSTICA

6.1.1. ABORDAGEM INICIAL

O auditório do edifício *Esmoriztur* em Esmoriz, será utilizado para múltiplos fins culturais e artísticos. Um projeto de acústica variável será, pois, essencial para o bom funcionamento deste tipo de auditório, sendo necessário, como ponto de partida, estabelecer quais os tipos de atividades que o espaço irá albergar para que, no projeto, sejam utilizados elementos acústicos que os beneficiem maioritariamente.

Junto do Dono de Obra tentou perceber-se quais seriam os tipos de espetáculo que iriam ser atraídos para este auditório e quais seriam aqueles que iriam ter uma maior cota de importância. Obteve-se, portanto, por parte do primeiro, a informação de que este espaço cultural tinha como objetivo albergar espetáculos de música *Pop/Rock*, de *Câmara* e *Sinfónica*, de Teatro, Cinema e atividades relacionadas com conferências ou palestras.

Para permitir uma melhor conceção do projeto acústico foi pedido que se estabelecesse uma estimativa percentual do uso futuro do auditório para cada tipo de espetáculos/atividades previstos.

Espetáculos de música *Pop/Rock*, *Teatro* e *Cinema* irão assumir uma maior importância no uso desta sala, sendo que conferências também serão um tipo de atividade com algum relevo e, com menos interesse alguns espetáculos de música de *Câmara* e *Sinfónica*.

Em termos percentuais foi obtida uma estimativa aproximada da utilização do auditório de 30% para espetáculos de música *Pop/Rock*, 30% para o *Teatro*, 20% para uso cinematográfico, 15% para eventos relacionados com conferências (palavra) e os restantes 5% para concertos de música de *Câmara* e *Sinfónica* (Figura 6.1).

Tendo em conta esta informação, foi então decidido dar mais ênfase a um projeto de correção acústica que beneficiasse principalmente espetáculos de música *Pop/Rock*, *Teatro* e *Cinema*, não desprezando, totalmente, a capacidade que o auditório terá de também acolher as restantes atividades. Em relação à utilização da sala para conferências não irá existir um grande problema pois será uma atividade, que tal como o Teatro, tem como elemento mais importante a palavra. Espetáculos de música de câmara e sinfónica serão os que devem precisar de um esforço extra em termos de acústica variável para que sejam compatíveis com a disposição e colocação dos elementos acústicos para as atividades principais.

PERCENTAGENS DE UTILIZAÇÃO DO AUDITÓRIO DO CINETEATRO DE ESMORIZ

■ Música Pop/Rock ■ Teatro ■ Cinema ■ Conferências ■ Música Sinfónica e de Câmara

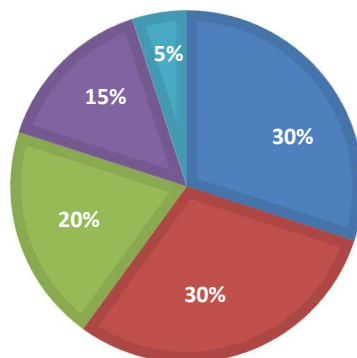


Figura 6.1 - Percentagens de utilização do auditório do cineteatro de Esmoriz para cada tipo de atividade de acordo com o Dono de Obra.

6.1.2. SUPERFÍCIES DE REFLEXÃO

Assegurar que as ondas sonoras cheguem uniformemente a todos os pontos do auditório é essencial para que o público usufrua de uma boa experiência do espetáculo a que está a assistir. Como foi referido em capítulos anteriores, a chegada do som desde o palco aos espectadores pode ser feita de modo direto e/ou através de reflexões.

As reflexões são importantes para que o som chegue suficientemente forte e homogéneo mesmo nos pontos mais distantes do palco. Como se sabe, nem todas as reflexões são benignas pois as reflexões tardias causam dificuldade de interpretação seja na música, seja na palavra.

Através da figura 6.2 percebe-se que o som direto proveniente do palco chega com alguma eficácia aos lugares mais próximos, mas que na bancada superior poderá existir alguma dificuldade na chegada das ondas diretas devido à obstrução dos assentos posteriores. Sabe-se já também, que em plateias com pouca inclinação, como é o caso (8°), poderão existir problemas na perda de intensidade do som nas baixas frequências.

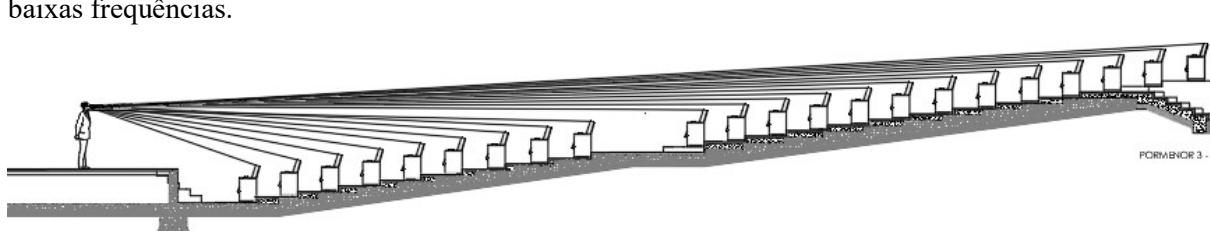


Figura 6.2 - Caminho percorrido pelo som direto até às várias filas de assentos da plateia no auditório do cineteatro de Esmoriz.

Com vista a combater os problemas referidos anteriormente, foi decidido idealizar um teto em placas de gesso cartonado de 1,5 cm, suspensas a partir de uma estrutura metálica colocada próxima da cobertura com vista a suportar as condutas de ventilação que aí estarão colocadas. Este teto terá de ser capaz de

fazer chegar, através de reflexões, algum do som do palco até à plateia. Foi tida em atenção a necessidade de dimensionar placas suficientemente grandes, capazes de conseguirem refletir ondas sonoras de baixas frequências (comprimentos de onda maiores). Foram escolhidos painéis em gesso cartonado, pois apresentam coeficientes de absorção sonora baixos em todas as frequências para que as ondas sejam refletidas de forma eficaz e para que estas não diminuam significativamente o seu nível de pressão sonora aquando da reflexão.

Tendo a presença das condutas de AVAC a uma cota de dois metros abaixo da cobertura, teve de ter-se em atenção a colocação do teto refletor abaixo destas.

Sabendo que o ângulo de incidência das ondas sonoras é igual ao ângulo de saída a partir de uma superfície refletora (em superfícies não difusoras), dimensionou-se e estudou-se a posição das placas de gesso cartonado de modo a conseguir chegar as ondas sonoras ao maior número de pontos possíveis do auditório, tendo sempre em atenção que o atraso das reflexões não fosse demasiado elevado.

O dimensionamento das placas refletoras foi realizado com o método simplificado demonstrado na figura 6.3. Foi tida em atenção a colocação de uma placa refletora que fizesse chegar também reflexões à cabine da *régie* presente na parte superior do auditório.

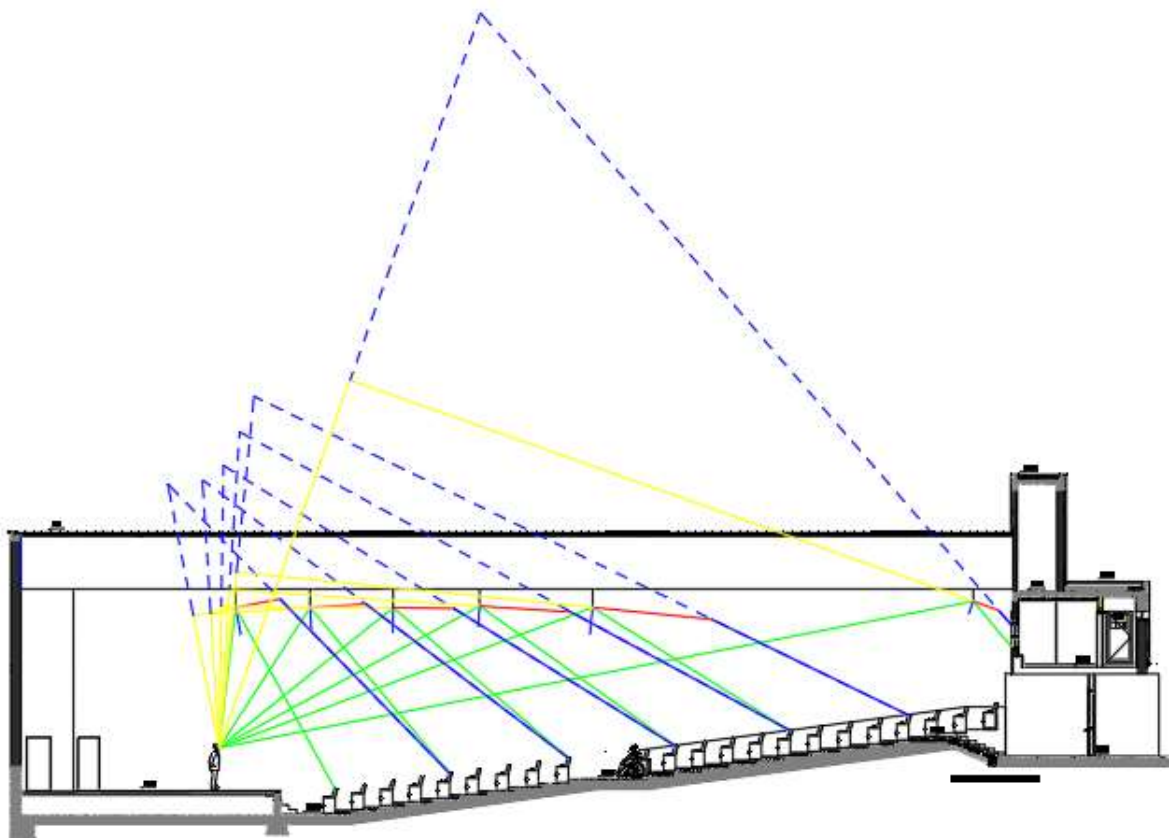


Figura 6.3 - Dimensionamento dos painéis refletoras em gesso cartonado no teto e as respetivas reflexões provocadas por cada um (vermelho: painéis de gesso cartonado; verde e azul: reflexões provocadas pelas superfícies refletoras).

A largura dos painéis foi prolongada em relação à dimensão destes na figura 6.3 de forma a se conseguirem proporcionar reflexões das ondas de baixas frequências. Outro dos motivos para o prolongamento dos painéis recai sobre a necessidade de “esconder”, por razões estéticas, as condutas de ventilação colocadas acima. Foi também decidido colocar um painel suspenso na zona do palco a uma altura de cerca de 7 metros para proporcionar reflexões benígnas para os executantes do espetáculo/atividade a decorrer. Para espetáculos de música estas reflexões adquirem maior importância devido à necessidade que os músicos têm em conseguirem ouvir os restantes músicos, como a si mesmos. A disposição final destes painéis refletorantes está representada nas figuras 6.4 e 6.5, em alçado e em planta, respetivamente.

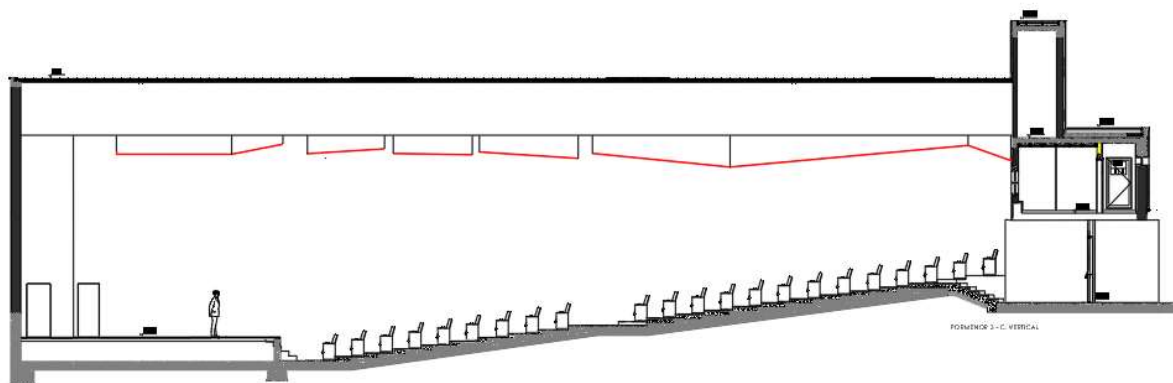


Figura 6.4 - Alçado do auditório do cineteatro de Esmoriz com a respetiva disposição dos painéis refletorantes de teto.

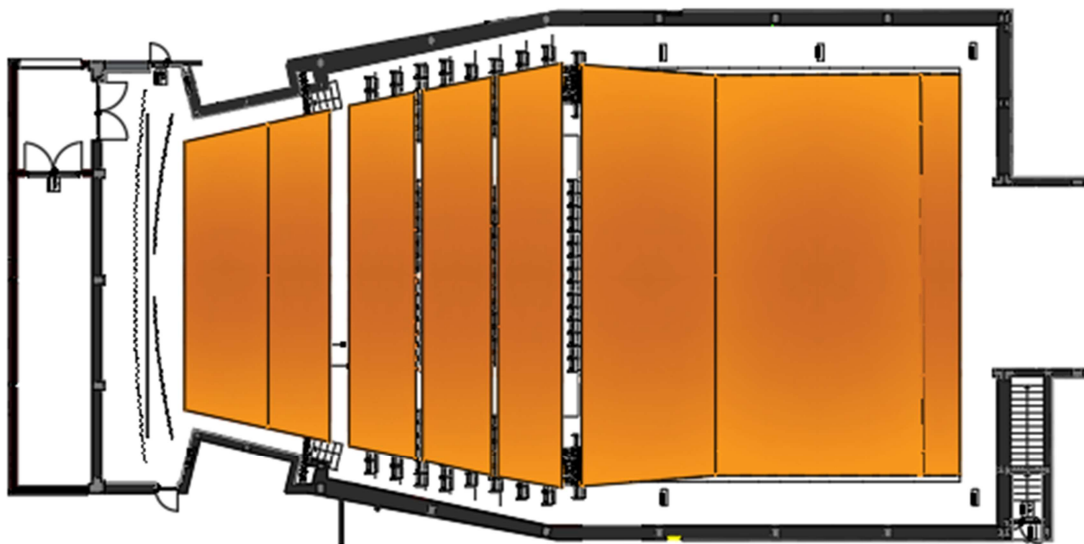


Figura 6.5 - Planta do auditório do cineteatro de Esmoriz com a respetiva disposição dos painéis refletorantes de teto.

Além das reflexões do teto, foi decidido dimensionar, também, superfícies que refletissem lateralmente as ondas sonoras provenientes do palco até à plateia. Como foi referido em capítulos anteriores, as reflexões laterais são importantes no sentido de criar no espectador um sentimento de fonte sonora mais ampla e de efeito espacial ótimo devido a reflexões de ondas sonoras de baixas frequências. As reflexões sonoras iniciais produzidas por superfícies refletoras laterais proporcionam também uma sensação de proximidade dos artistas no palco com a plateia.

Foram então dimensionados painéis de dois centímetros de espessura em madeira maciça de pinho envernizada, a serem dispostos em ângulos calculados de forma a produzirem reflexões laterais para os lugares junto às paredes tanto na bancada inferior como na superior. Foi escolhido como material, a madeira envernizada devido aos seus baixos valores do coeficiente de absorção sonora, o que permite que o processo de reflexão das ondas sonoras se faça de forma mais eficaz.

Na bancada inferior da plateia estas reflexões serão importantes pois os painéis suspensos não cobrem a totalidade dos lugares colocados nas extremidades laterais, e na bancada superior torna-se favorável proporcionar estas reflexões para que em lugares mais afastados o nível de pressão sonora não seja demasiado fraco.

O princípio de dimensionamento destas superfícies foi o mesmo utilizado para o dimensionamento dos painéis do teto, tendo em conta o princípio da igualdade dos ângulos de incidência e de reflexão (Figura 6.6).

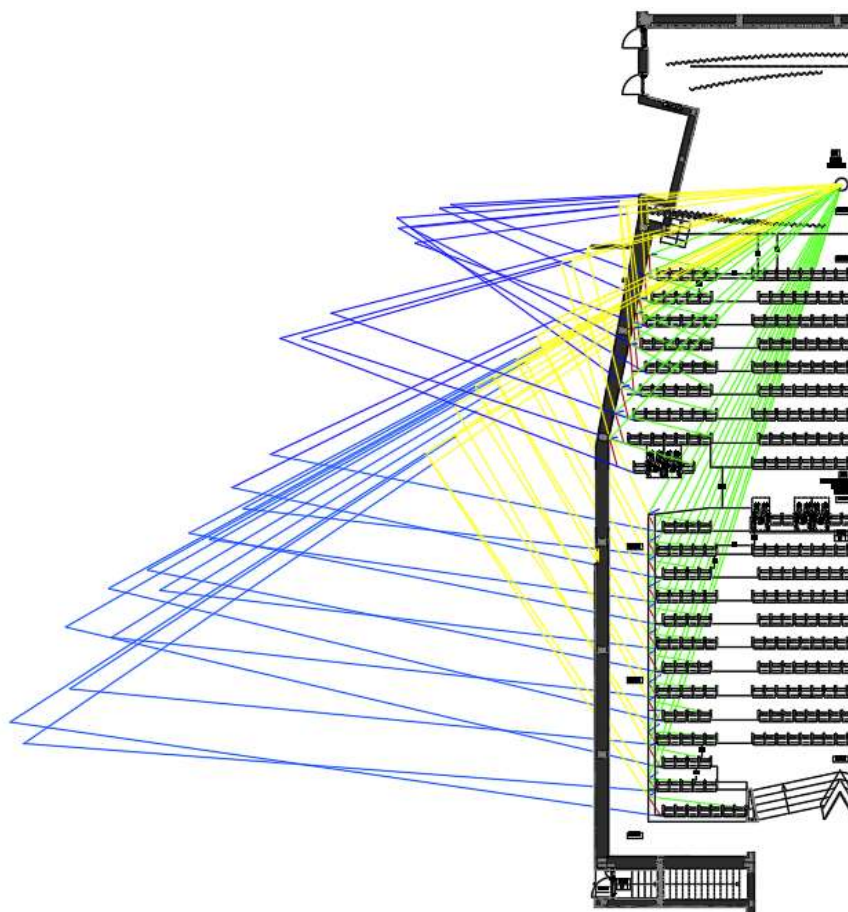


Figura 6.6 - Dimensionamento dos painéis refletoras laterais em madeira envernizada e as respetivas reflexões provocadas por cada um (vermelho: painéis de gesso cartonado; verde e azul: reflexões provocadas pelas superfícies refletoras).

A disposição dos painéis refletorres em madeira (pinho) maciça envernizada é demonstrada na figura 6.7 e 6.8 em alçado e em planta, respetivamente. Os painéis de madeira serão fixados às paredes laterais de alvenaria tanto na bancada inferior como na bancada superior. A fixação será realizada através de uma estrutura metálica com dispositivos resilientes, demonstrados mais à frente, de modo a impedir a criação de ruídos incómodos provenientes da vibração destas.

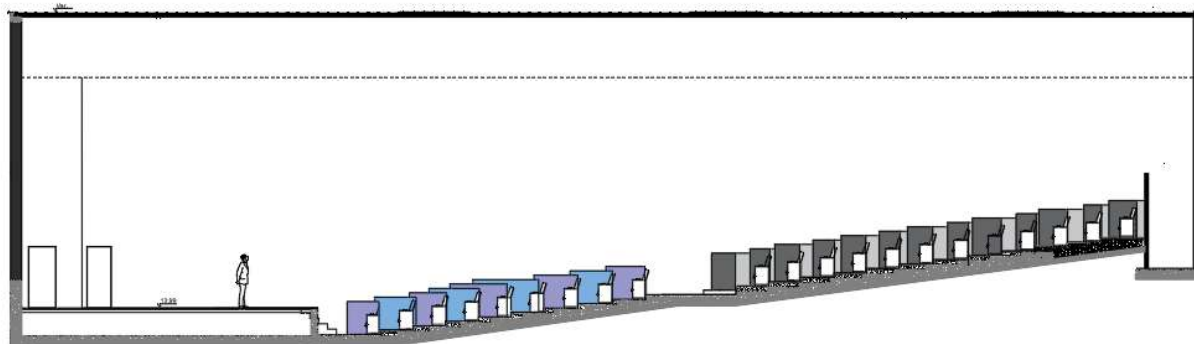


Figura 6.7 - Disposição dos elementos de reflexão lateral no auditório do cineteatro, em alçado.

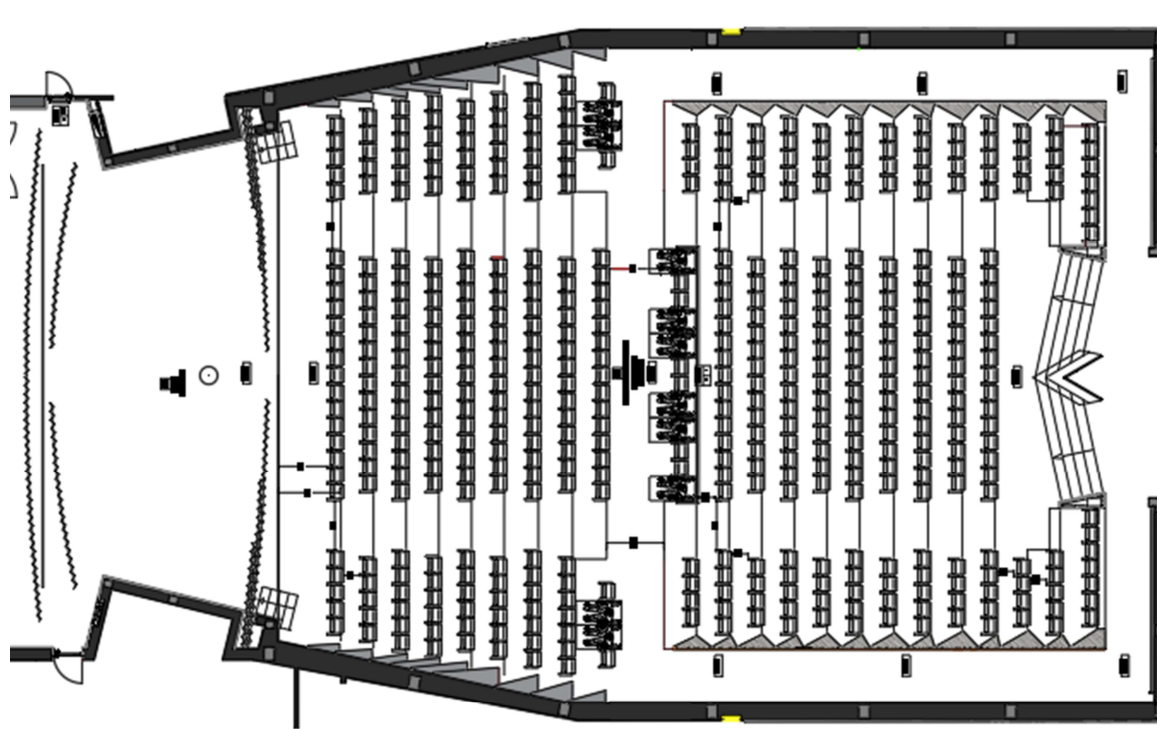


Figura 6.8 - Disposição dos elementos de reflexão lateral no auditório do cineteatro, em planta.

Foi necessário perceber se as reflexões originadas por estas superfícies, tanto as de teto como as laterais, não chegavam demasiado atrasadas em relação à chegada do som direto. Sabendo que a velocidade do som no ar é de cerca de 340 m/s e que para uma boa inteligibilidade da palavra o desfasamento temporal entre a chegada do som direto e das ondas sonoras provenientes de reflexões não deverá ser superior a

50 milissegundos, conclui-se que a diferença entre o caminho percorrido pelo som direto e pelo som refletido deve ser menor a 17 metros (Figura 6.9), (Quadro 6.1).

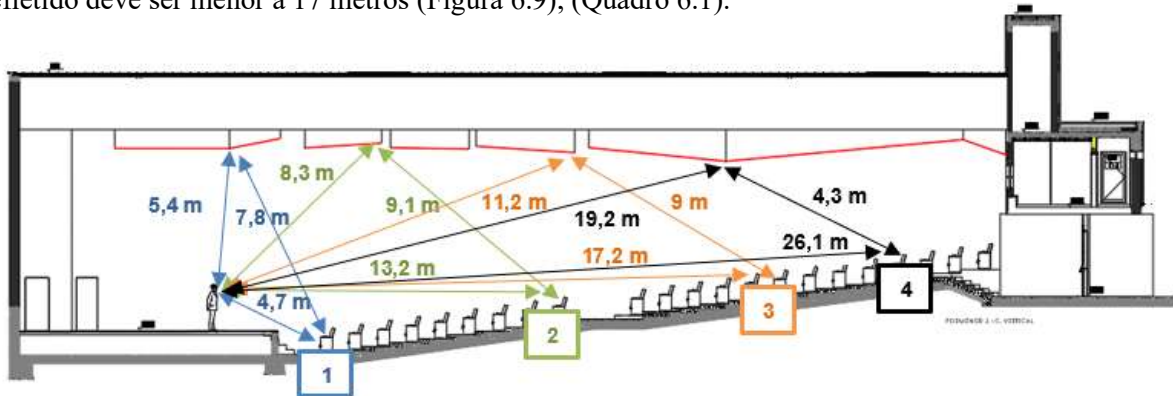


Figura 6.9 - Distâncias percorridas pelo som direto e pelo som refletido proveniente dos painéis refletores do teto em vários pontos do auditório.

Quadro 6.1 - Cálculo da diferença das distâncias percorridas entre o som direto e o som refletido proveniente dos painéis refletores do teto.

Posições no auditório	Distância percorrida pelo som direto (m)	Distância percorrida pelo som refletido (m)	Diferença da distância percorrida entre o som refletido e o som direto (m)	Verificação (<17m)
1	4,7	$5,4 + 7,8 = 13,2$	$13,2 - 4,7 = 8,5$	OK
2	13,2	$8,3 + 9,1 = 17,4$	$17,4 - 13,2 = 4,2$	OK
3	17,2	$11,2 + 9,0 = 20,2$	$20,2 - 17,2 = 3,0$	OK
4	26,1	$19,2 + 4,3 = 23,8$	$26,1 - 23,8 = 2,3$	OK

Em relação às ondas sonoras refletidas a partir das superfícies laterais, não será relevante fazer o cálculo da diferença de distâncias percorridas entre som direto e refletido, pois os painéis encontram-se posicionados muito próximos dos assentos, sem nunca obstruírem a visão do espectador e proporcionando uma melhor experiência sonora. Essa diferença será mínima, pelo que estará dentro dos parâmetros definidos para uma boa inteligibilidade da palavra.

É necessário ter em atenção as reflexões tardias que podem chegar ao palco a partir das paredes traseiras do auditório. Com vista a evitar este fenómeno negativo seria fundamental tratar acusticamente essas superfícies.

Decidiu-se, desta forma, colocar material absorvente em algumas superfícies usando painéis absorventes do tipo *Silantium BT60 Bruto* (Figura 6.10) da marca *SILÊNCIO* com uma espessura de seis centímetros e com elevados valores de coeficiente de absorção sonora, maioritariamente nas altas frequências (Quadro 6.2).

Em outras áreas dos elementos verticais traseiros (Figura 6.11) decidiu-se colocar superfícies que fossem difusoras e permitissem que as ondas sonoras fossem redirecionadas para outros locais do auditório que não para o palco para evitar a chegada de reflexões tardias a essa zona. Foi determinada a utilização de painéis de madeira (pinho) maciça envernizada da marca *IDEATEC* (Figura 6.10) com baixa absorção sonora (Quadro 6.2) que permitirá uma otimização das reflexões por difusão.



Figura 6.10 - À esquerda, o painel absorvente *Silentium BT60 Bruto* [48] e à direita, o painel difusor em madeira maciça (pinho) envernizada da *Ideatec* [49].

Quadro 6.2 - Coeficientes de absorção sonora (α) do painel absorvente *Silentium BT60 Bruto* [48] e do painel difusor em madeira maciça (pinho) envernizada da *Ideatec* [49].

Banda de Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α (painel absorvente)	0,20	0,71	0,82	1,00	1,00	1,00
α (painel difusor)	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02

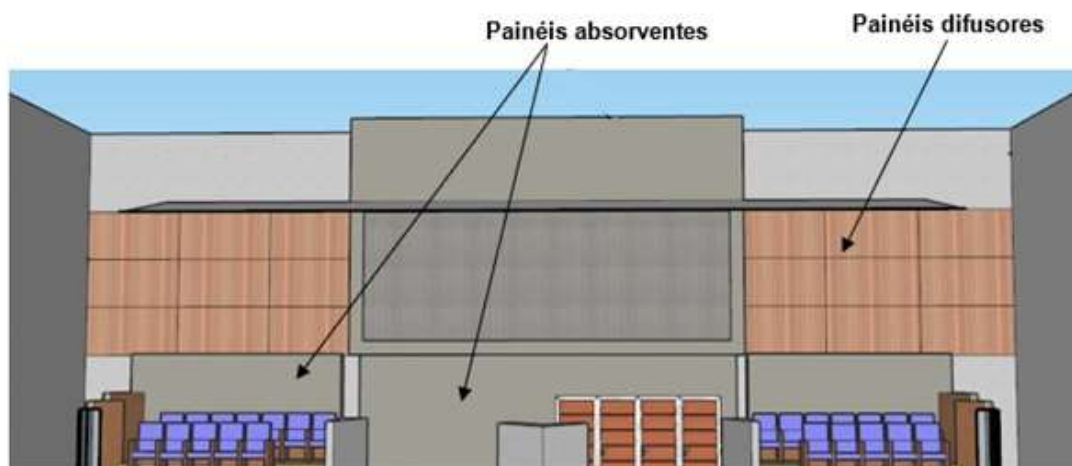


Figura 6.11 - Vista traseira do auditório com a indicação das superfícies a serem revestidas com painéis absorventes e painéis difusores.

6.1.3. REVESTIMENTO DO PAVIMENTO

Tendo em conta a vontade do Dono de Obra, foi decidido revestir o pavimento do auditório com manta têxtil na zona da plateia, incluindo rampas e escadas. A escolha do pavimento têxtil recaiu sobre a utilização de uma carpete fina de seis milímetros (Figura 6.12), usual neste tipo de auditórios. A carpete será colada ao betão através de uma cola unilateral de dispersão acrílica do tipo *EurosafeSpecial 540*.

Os coeficientes de absorção sonora (α) típicos de uma carpete fina de 6 milímetros colada sobre o betão são apresentados no quadro 6.3.



Figura 6.12 - Exemplo de uma carpete fina de 6 mm a ser colocada como revestimento do pavimento do auditório do cineteatro [50].

Quadro 6.3 - Coeficientes de absorção sonora (α) de uma carpete fina de 6 mm colada sobre o betão [51].

Banda de Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α	0,10	0,15	0,25	0,30	0,30	0,30

6.1.4. ACESSOS AO AUDITÓRIO

A planta original do edifício do cineteatro de Esmoriz mostra que o acesso ao auditório por parte do público era realizado através de três entradas. A entrada principal encontrava-se no topo da sala e as outras duas nas laterais a meio da sala.

Com o objetivo de cumprir as normas de segurança contra incêndios em anfiteatros presente no *Regulamento de Segurança Contra Incêndios (RSCIE)* de 2019, decidiu-se manter as entradas originais do auditório, cumprindo desta forma o número mínimo de saídas (3) e de unidades de passagem (5).

Foi decidido fazer alterações na entrada principal da sala, com o objetivo de reduzir a interferência dos possíveis ruídos provenientes dos *foyers* no espetáculo a ser realizado no auditório.

A alteração passou pela decisão de criar uma antecâmara (Figura 6.15) na qual fosse possível anular a entrada de ruídos oriundos do *foyer* central. São propostas paredes e tetos falsos em gesso cartonado de 1,5 cm com uma caixa de ar de 125 mm entre esta e a parede de alvenaria. As placas de gesso cartonado terão um acabamento estanhado de 25 mm do tipo *SONACOUSTIC* (Figura 6.13) da marca *STIER*, aplicável sobre qualquer superfície. Este acabamento permite obter valores de coeficientes de absorção sonora elevados, principalmente nas altas frequências (Figura 6.14).



Figura 6.13 - Exemplo de paredes e tetos com acabamento estanhado *Sonacoustic* [52].

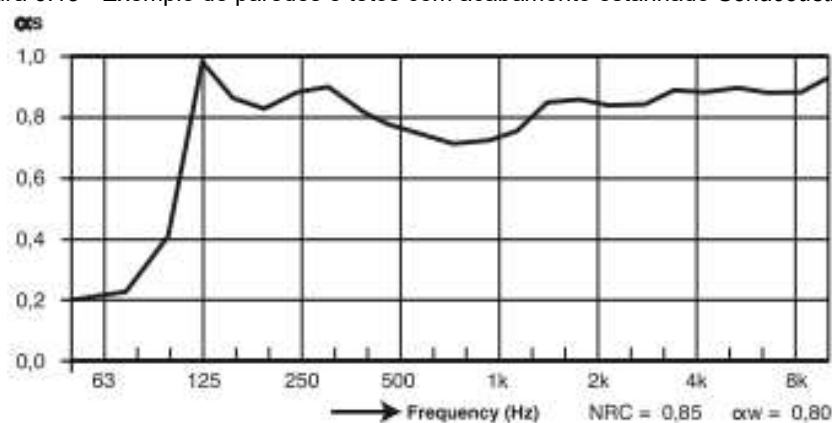


Figura 6.14 - Coeficientes de absorção do acabamento estanhado *Sonacoustic* de 25 mm, com a existência de uma caixa de ar de 125 mm [52].

Convém também referir que esta antecâmara será importante para impedir que o ruído proveniente do auditório possa interferir em alguma das atividades que possam estar a ser realizadas simultaneamente nos *foyers* envolventes.

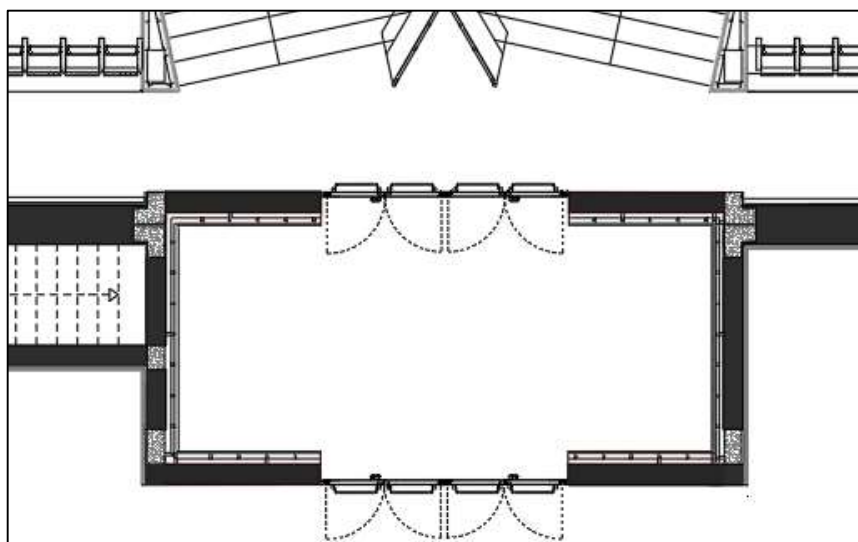


Figura 6.15 – Proposta da antecâmara de entrada para o auditório do cineteatro, em planta.

Como é possível verificar na figura 6.15 existirão quatro portas em cada saída/entrada da antecâmara. Foram escolhidas portas revestidas a madeira (970 x 2170 mm) do tipo *Silentium PM 35R*, da marca *Silêncio* (Figura 6.16) com um índice de redução sonora (R_w) de 35 dB e com coeficientes de absorção sonora apresentados no quadro 6.4.

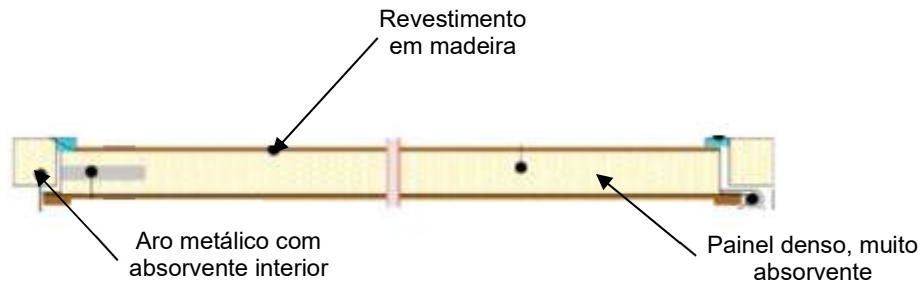


Figura 6.16 - Corte horizontal de uma porta *Silentium PM 35R*, da marca *Silêncio* [53].

Quadro 6.4 - Coeficientes de absorção sonora (α) de uma porta *Silentium PM 35R* [53].

Banda de Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α	0,35	0,39	0,44	0,49	0,54	0,57

Também serão colocadas mais quatro portas na zona do palco, duas nas laterais para acesso aos camarins e outras duas para o acesso a uma antecâmara com ligação a uma zona de cargas e descargas. (Figura 6.17).

As portas de acesso à zona de cargas e descargas e de acesso aos camarins deverão ter um índice de isolamento sonoro mais elevado devido ao ruído que possa ser produzido nesses locais e que possam interferir negativamente na *performance* dos executantes em palco, sendo que as restantes duas entradas laterais de acesso ao auditório terão também de ter portas com um índice de isolamento sonoro mais significativo.

Serão, então, utilizadas portas revestidas a madeira (970 x 2170 mm na zona do palco e 1570 x 2170 mm nos acessos laterais ao auditório) do tipo *Silentium PM 43R* (Figura 6.18) com um índice de redução sonora de 46 dB e coeficientes de absorção sonora apresentados no quadro 6.5.

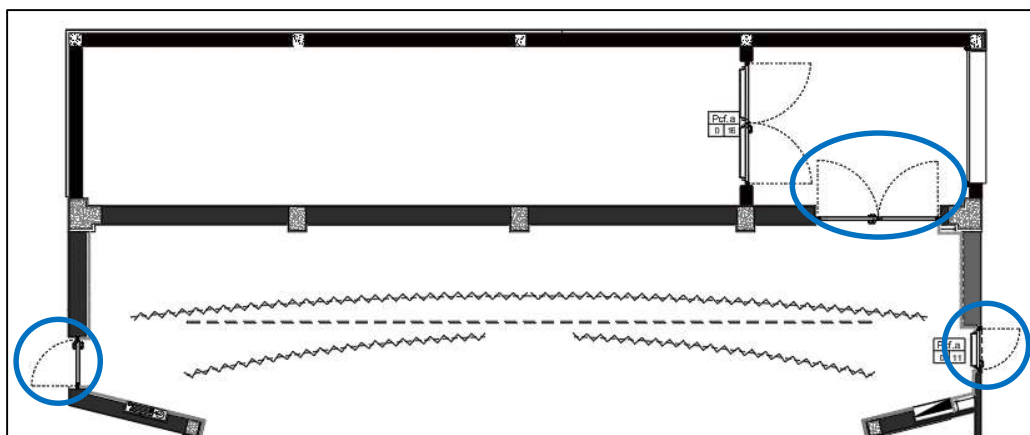


Figura 6.17 - Locais na zona do palco onde serão colocadas portas *Silentium PM43R* (a azul).

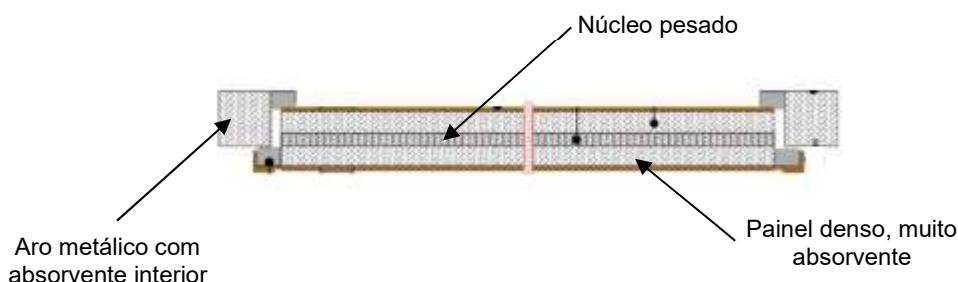


Figura 6.18 - Corte horizontal de uma porta *Silentium PM 43R*, da marca *Silêncio* [54].

Quadro 6.5 - Coeficientes de absorção sonora (α) de uma porta *Silentium PM 43R* [54].

Banda de Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α	0,39	0,41	0,46	0,52	0,57	0,59

6.1.5. EFEITO DA ABSORÇÃO SONORA DAS SUPERFÍCIES DE REFLEXÃO/ PAVIMENTO E PORTAS

Para se poder avançar com o restante tratamento acústico do auditório é fundamental perceber qual o efeito das superfícies de reflexão, do pavimento têxtil e da colocação das portas, no tempo de reverberação da sala. Como foi referido anteriormente, serão usadas placas de gesso cartonado de 3 cm para os refletores de teto e madeira maciça de pinho envernizada de 2 cm para os refletores laterais.

Os valores dos coeficientes de absorção sonora do gesso cartonado e da madeira maciça envernizada são apresentados no quadro 6.6.

Quadro 6.6 - Coeficientes de absorção sonora de placas de gesso cartonado de 3 cm e de madeira maciça de pinho envernizada de 2 cm [55].

Banda de Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α (gesso cartonado)	0,10	0,08	0,05	0,03	0,03	0,03
α (madeira envernizada)	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02

O cálculo dos valores do tempo de reverberação será realizado recorrendo à *fórmula de Sabine*, considerando para a sala um volume aproximado de 8574 m³ e tendo em conta o valor da absorção sonora equivalente da sala vazia (à exceção das condutas AVAC e cadeiras) e fechada, contabilizando o efeito da absorção do ar.

Sabendo os valores dos tempos de reverberação (TR) por bandas de frequência de 1/1 oitava consegue-se, então, obter os valores de absorção sonora (A) através da fórmula (6.1) (Quadro 6.7).

$$TR = \frac{0,16 \cdot 8574}{A} \quad (s) \quad (6.1)$$

Quadro 6.7 - Valores de absorção sonora equivalente (A) por bandas de frequência de 1/1 oitava, referente ao auditório vazio (à exceção de cadeiras e condutas AVAC) e fechado.

Banda de Frequência (Hz)	TR (s)	A_{vazio} (m ²)
125	1,82	753,63
250	1,40	978,79
500	1,32	1038,33
1000	1,39	984,07
2000	1,48	924,91
4000	1,33	1031,82

Sabendo que o parâmetro da absorção sonora equivalente (A) resulta da multiplicação do valor do coeficiente de absorção (α) pela área de superfície do respetivo material (S), a absorção sonora equivalente referente ao teto refletor em gesso cartonado será resultado da equação (6.2), pela qual se obtiveram os valores apresentados no quadro 6.8.

$$A_{gesso} = \alpha_{gesso} * S_{gesso} \quad (\text{m}^2) \quad (6.2)$$

Quadro 6.8 - Valores da absorção sonora equivalente do teto refletor em gesso cartonada por bandas de frequência de 1/1 oitava.

Teto refletor (Gesso Cartonado)			
Banda de frequência (Hz)	α	S (m ²)	A_{gesso} (m ²)
125	0,10	569	56,9
250	0,08		45,5
500	0,05		28,5
1000	0,03		17,1
2000	0,03		17,1
4000	0,03		17,1

A absorção sonora equivalente referente às superfícies refletoras laterais em madeira maciça de pinho envernizada será resultado da equação (6.3), pela qual se obtiveram os valores apresentados no quadro 6.9.

$$A_{madeira} = (\alpha_{madeira} * S_{madeira}) - (\alpha_{alvenaria} * S_{alvenaria}) \quad (\text{m}^2) \quad (6.3)$$

Quadro 6.9 - Valores da absorção sonora equivalente das superfícies refletoras laterais em madeira de pinho envernizada por bandas de frequência de 1/1 oitava.

Superfícies refletoras laterais (Madeira Envernizada)					
Banda de Frequência (Hz)	$\alpha_{madeira}$	$S_{madeira} (m^2)$	$\alpha_{alvenaria}$	$S_{alvenaria} (m^2)$	$A_{madeira} (m^2)$
125	0,05	127	0,01	52	6,2
250	0,04		0,01		5,0
500	0,03		0,01		3,7
1000	0,03		0,02		3,6
2000	0,03		0,02		3,6
4000	0,02		0,03		2,2

A absorção sonora equivalente referente ao revestimento do pavimento, com uma carpete fina de 6 mm colada ao betão, será resultado da equação (6.4), pela qual se obtiveram os valores apresentados no quadro 6.10.

$$A_{carpete} = (\alpha_{carpete} - \alpha_{betão}) * S_{carpete} \quad (m^2) \quad (6.4)$$

Quadro 6.10 - Valores da absorção sonora equivalente do pavimento revestido com carpete fina de 6 mm colada sobre o betão por bandas de frequência de 1/1 oitava.

Pavimento em carpete de 6 mm				
Banda de Frequência (Hz)	$\alpha_{carpete}$	$\alpha_{betão}$	$S_{carpete} (m^2)$	$A_{carpete} (m^2)$
125	0,10	0,01	594	53,5
250	0,15	0,01		83,1
500	0,25	0,02		136,6
1000	0,30	0,02		166,3
2000	0,30	0,02		166,3
4000	0,30	0,02		166,3

A absorção sonora equivalente referente às quatro portas *Silentium PM 35R* colocadas na entrada no topo do auditório, será resultado da equação (6.5), pela qual se obtiveram os valores apresentados no quadro 6.11.

$$A_{portas (35R)} = (\alpha_{portas (35R)} - \alpha_{alvenaria}) * S_{portas (35R)} \quad (m^2) \quad (6.5)$$

Quadro 6.11 - Valores da absorção sonora equivalente das quatro portas *Silentium PM 35R*, colocadas no topo do auditório, por bandas de frequência de 1/1 oitava.

Portas <i>Silentium PM 35R</i>				
Banda de Frequência (Hz)	$\alpha_{portas (35R)}$	$\alpha_{alvenaria}$	$S_{portas (35 R)} (m^2)$	$A_{portas (35R)} (m^2)$
125	0,35	0,01	4 x (0,94 x 2,07)	2,7
250	0,39	0,01		3,0
500	0,44	0,01		3,4
1000	0,49	0,02		3,7
2000	0,54	0,02		4,1
4000	0,57	0,03		4,2

A absorção sonora equivalente referente às quatro portas *Silentium PM 43R* colocadas na zona do palco na antecâmara de acesso à zona de cargas e descargas, no acesso aos camarins e nas saídas laterais do auditório, será resultado da equação (6.6), pela qual se obtiveram os valores apresentados no quadro 6.12.

$$A_{portas (43R)} = (\alpha_{portas (43R)} - \alpha_{alvenaria}) * S_{portas (43R)} \quad (m^2) \quad (6.6)$$

Quadro 6.12 - Valores da absorção sonora equivalente das seis portas *Silentium PM 43R*, colocadas na zona do palco na antecâmara de acesso à zona de cargas e descargas, de acesso aos camarins e nas duas saídas laterais do auditório, por bandas de frequência de 1/1 oitava.

Portas <i>Silentium PM 43R</i>				
Banda de Frequência (Hz)	$\alpha_{portas (43R)}$	$\alpha_{alvenaria}$	$S_{portas (43 R)} (m^2)$	$A_{portas (43R)} (m^2)$
125	0,39	0,01	4 x (0,97 x 2,17) + 2 x (1,57 x 2,17)	5,18
250	0,41	0,01		5,45
500	0,46	0,01		6,13
1000	0,52	0,02		6,82
2000	0,57	0,02		7,50
4000	0,59	0,03		7,63

A absorção sonora equivalente referente ao revestimento de superfícies de elementos verticais traseiros com painéis absorventes *Silentium BT60 BRUTO*, será o resultado da equação (6.7), pela qual se obtiveram os valores apresentados no quadro 6.13.

$$A_{\text{painéis (BT60)}} = (\alpha_{\text{painéis (BT60)}} - \alpha_{\text{alvenaria}}) * S_{\text{painéis (BT60)}} \quad (\text{m}^2) \quad (6.7)$$

Quadro 6.13 - Valores da absorção sonora equivalente de painéis absorventes *Silentium BT60 BRUTO* colocados em elementos verticais na parte traseira do auditório, por bandas de frequência de 1/1 oitava.

Painéis absorventes <i>Silentium BT60 BRUTO</i>				
Banda de Frequência (Hz)	$\alpha_{\text{painéis (BT60)}}$	$\alpha_{\text{alvenaria}}$	$S_{\text{painéis (BT60)}} (\text{m}^2)$	$A_{\text{painéis}} (\text{m}^2)$
125	0,20	0,01	60	11,4
250	0,71	0,01		42,0
500	0,82	0,01		48,6
1000	1,00	0,02		58,8
2000	1,00	0,02		58,8
4000	1,00	0,03		58,2

A absorção sonora equivalente referente ao revestimento de superfícies de elementos verticais traseiros com painéis difusores em madeira maciça de pinho envernizada da *Ideatec* será resultado da equação (6.8), pela qual se obtiveram os valores apresentados no quadro 6.14.

$$A_{\text{painéis difusores}} = (\alpha_{\text{painéis difusores}} - \alpha_{\text{alvenaria}}) * S_{\text{painéis difusores}} \quad (\text{m}^2) \quad (6.8)$$

Quadro 6.14 - Valores da absorção sonora equivalente de painéis difusores em madeira maciça de pinho envernizada da *Ideatec* colocados em elementos verticais na parte traseira do auditório, por bandas de frequência de 1/1 oitava.

Painéis difusores em madeira maciça envernizada da <i>Ideatec</i>				
Banda de Frequência (Hz)	$\alpha_{\text{painéis difusores}}$	$\alpha_{\text{alvenaria}}$	$S_{\text{painéis difusores}} (\text{m}^2)$	$A_{\text{painéis difusores}} (\text{m}^2)$
125	0,05	0,01	27,3	1,1
250	0,04	0,01		0,8
500	0,03	0,01		0,6
1000	0,03	0,02		0,3
2000	0,03	0,02		0,3
4000	0,02	0,03		- 0,3*

*O valor da absorção sonora equivalente encontra-se com sinal negativo, pois os painéis difusores na banda de frequência de 4kHz possuem um coeficiente de absorção sonora menor que o da alvenaria, pelo que, na fórmula de Sabine, este valor terá de ser subtraído e não somado.

Tendo os valores da absorção sonora equivalente de cada material e recorrendo novamente à fórmula de *Sabine* (6.9), consegue-se obter os valores do tempo de reverberação da sala por bandas de frequências de 1/1 oitava do auditório com a presença dos materiais anteriormente referidos.

Para o cálculo foi utilizado um volume de 8574 m³, e são somados algebricamente os valores da absorção sonora equivalente de todos os materiais referidos ao valor da sala vazia que contabiliza já a parcela da absorção sonora do ar, calculado anteriormente.

$$TR = \frac{0,16 * 8574}{A_{vazio} + \sum_{i=1}^N A_N} \quad (s) \quad (6.9)$$

Os valores do tempo de reverberação (*TR*) obtidos, aplicando a fórmula anterior, são apresentados no quadro 6.15.

Quadro 6.15 - Valores dos tempos de reverberação por bandas de frequências de 1/1 oitava do auditório com cadeiras, condutas AVAC, superfícies refletoras, portas, painéis absorventes e difusores.

<i>F</i> (Hz)	<i>A</i> _{vazio} (m ²)	<i>A</i> _{gesso} (m ²)	<i>A</i> _{madeira} (m ²)	<i>A</i> _{carpete} (m ²)	<i>A</i> _{portas} (35R) (m ²)	<i>A</i> _{portas} (43R) (m ²)	<i>A</i> _{painéis} (m ²)	<i>A</i> _{difusores} (m ²)	<i>A</i> _{total} (m ²)	<i>TR</i> (s)
125	754	56,9	6,2	53,5	2,7	5,18	11,4	1,1	891	1,54
250	979	45,5	5,0	83,1	3,0	5,45	42,0	0,8	1164	1,18
500	1034	28,5	3,7	136,6	3,4	6,13	48,6	0,6	1266	1,08
1000	984	17,1	3,6	166,3	3,7	6,82	58,8	0,3	1241	1,11
2000	925	17,1	3,6	166,3	4,1	7,50	58,8	0,3	1182	1,16
4000	1032	17,1	2,2	166,3	4,2	7,63	58,2	- 0,3*	1287	1,07

*O valor da absorção sonora equivalente encontra-se com sinal negativo, pois os painéis difusores na banda de frequência de 4kHz possuem um coeficiente de absorção sonora menor que o da alvenaria, pelo que, na fórmula de *Sabine*, este valor terá de ser subtraído e não somado.

6.1.6. IDENTIFICAÇÃO E RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS

Antes de se poder avançar com o restante tratamento acústico, é necessário analisar os dados do tempo de reverberação do auditório, para se conseguir perceber quais serão os materiais acústicos mais indicados a aplicar na sala e de que forma será mais eficaz dispô-los no espaço.

Os valores do tempo de reverberação previstos a obter (Quadro 6.15) após a colocação de elementos indispensáveis para o bom funcionamento do auditório como as condutas AVAC, as cadeiras, o revestimento do pavimento com carpete, as superfícies refletoras, portas, difusores e painéis absorventes indicam que o auditório carece de absorção sonora principalmente na zona das baixas frequências.

Verificaram-se valores de *TR* extremamente elevados na faixa dos 125 Hz quando comparadas com as outras frequências. Centrando-nos nas atividades que, segundo o Dono de Obra, terão mais ênfase no cartaz cultural do auditório (*Teatro* e música *Pop/Rock*), verifica-se uma necessidade de diminuir também os valores dos tempos de reverberação das médias e altas frequências, tendo sempre em atenção um projeto de acústica variável que sirva minimamente as restantes atividades que se possam aí realizar.

De forma a reduzir significativamente o tempo de reverberação das baixas frequências, foram seleccionados painéis de contraplacado de 3 mm de espessura (efeito de membrana) associados a uma caixa de ar de 150 mm preenchida com 75 mm de lã mineral (Figura 6.19).

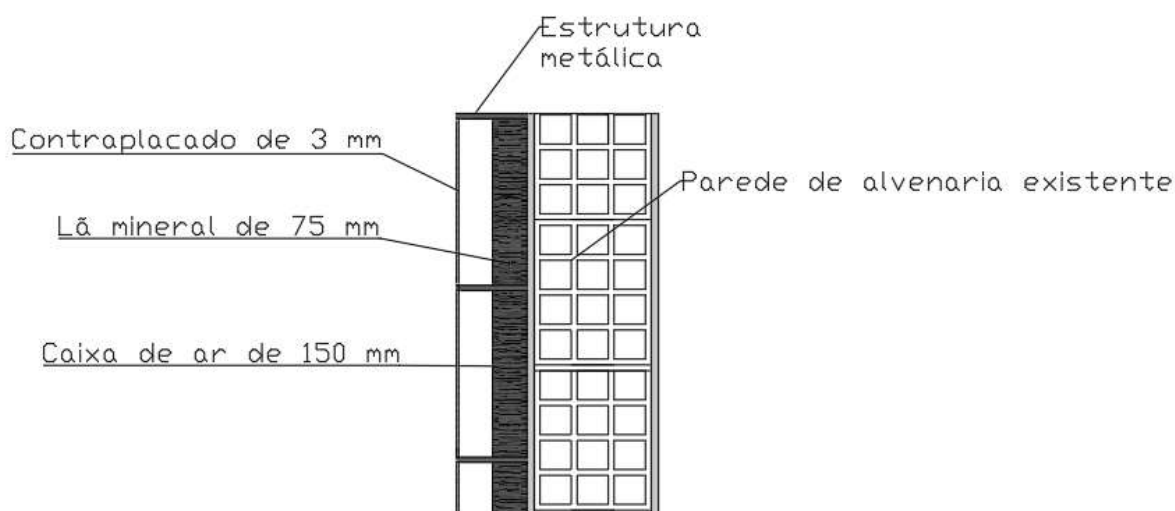


Figura 6.19 - Corte vertical do sistema de absorção sonora de baixas frequências com painéis de contraplacado de 3 mm de espessura associados a uma caixa de ar de 150 mm preenchida com 75 mm de lã mineral.

Este sistema de absorção sonora de baixas frequências será utilizado nas paredes laterais da zona do palco e em parte das paredes laterais traseiras com vista a obter uma área de superfície significativa para se conseguir diminuir consideravelmente o tempo de reverberação nessas frequências.

A área de superfície do sistema de contraplacado perfaz um total de 228 m². A absorção sonora equivalente do contraplacado será resultado da equação (6.10), pela qual se obtiveram os valores apresentados no quadro 6.16.

$$A_{\text{contraplacado}} = (\alpha_{\text{contraplacado}} - \alpha_{\text{alvenaria}}) * S_{\text{contraplacado}} \quad (\text{m}^2) \quad (6.10)$$

Quadro 6.16 - Valores da absorção sonora equivalente de um sistema composto por painéis de contraplacado de 3 mm de espessura associados a uma caixa de ar de 150 mm preenchida com 75 mm de lã mineral, colocados em parte das paredes laterais, por bandas de 1/1 oitava de frequência.

Painéis de contraplacado (3 mm) + caixa de ar (15cm)				
Banda de Frequência (Hz)	$\alpha_{\text{painéis contraplacado}}$	$\alpha_{\text{alvenaria}}$	$S_{\text{painéis contraplacado}} (\text{m}^2)$	$A_{\text{painéis contraplacado}} (\text{m}^2)$
125	0,50	0,01	228	111,7
250	0,30	0,01		66,1
500	0,10	0,01		20,5
1000	0,05	0,02		6,8
2000	0,05	0,02		6,8
4000	0,05	0,03		4,6

A absorção sonora dos painéis de contraplacado resultam numa redução dos valores do tempo de reverberação nas altas e baixas frequências. Através da *fórmula de Sabine* (6.11), obtêm-se os valores de TR atualizados, presentes no quadro 6.17.

$$TR = \frac{0,16 \cdot 8574}{A_{anterior} + A_{contraplacado}} \quad (s) \quad (6.11)$$

Quadro 6.17 - Valores dos tempos de reverberação previstos atualizados para a introdução do contraplacado em algumas paredes laterais.

Banda de Frequência (Hz)	$A_{anterior} (m^2)$	$A_{contraplacado} (m^2)$	$A_{total} (m^2)$	$TR (s)$
125	891	111,7	1003	1,37
250	1164	66,1	1230	1,12
500	1266	20,5	1287	1,07
1000	1241	6,8	1248	1,10
2000	1182	6,8	1189	1,15
4000	1287	4,6	1292	1,06

Tal como pretendido houve uma diminuição dos valores do tempo de reverberação mais acentuada nas baixas frequências e um abaixamento mais suave nas altas frequências. Estes valores não são, ainda, ideais para as atividades principais do futuro cartaz do cineteatro de Esmoriz, mas o restante tratamento acústico deverá ter agora um caráter variável para que possa ser eficaz nas diferentes experiências que a sala possa proporcionar.

Para espetáculos relacionados com música *Pop/Rock*, procura-se baixar ainda mais o TR das altas e médias frequências e majorar (x 1,25) o das baixas frequências em relação às restantes, com vista a obter um $TR_{médio}$ na ordem dos 1,0 segundos.

Para *Teatro*, *Cinema* e conferências, pretende-se chegar a uma redução dos valores de TR , sendo necessário diminuir, em maior escala, nas baixas frequências de forma a que a reverberação seja equitativa nas diferentes bandas de 1/1 oitava, com o objetivo de obter um $TR_{médio}$ na ordem dos 0,8/0,9 segundos.

Os valores ideais dos tempos de reverberação para espetáculos de música de câmara e para os de música sinfónica, são acima dos TR obtidos no quadro 6.17, mas não existe grande margem para melhorar, pois com a introdução das cadeiras e da alcatifa na plateia (exigidos pelo Dono de Obra) já foi o suficiente para se terem estes valores. Portanto, a única coisa a fazer é tentar não diminuir, ainda mais, os valores de TR para este tipo de espetáculos.

6.1.7. PROJETO DE ACÚSTICA VARIÁVEL

Tendo em vista o objetivo de criar uma sala com acústica variável que beneficiasse, de alguma forma, todas as atividades que aí fossem realizadas, privilegiando sempre as de maior importância (para o Dono de Obra) como a música *Pop/Rock*, *Teatro* e *Cinema* foi necessário criar dispositivos e sistemas que pudessem moldar o auditório de forma a terem-se valores do tempo de reverberação um pouco diferentes conforme o tipo de espetáculo.

Perante isto, foi decidido conceber um sistema que conseguisse baixar o tempo de reverberação nas baixas frequências, aproximando-o de 1 segundo, para atividades em que se privilegia a palavra (*Teatro*, *Cinema* e conferências), mas que simultaneamente pudesse baixar mais ligeiramente para espetáculos de música *Pop/Rock*.

Era também necessário baixar o tempo de reverberação das médias e altas frequências para as atividades referidas anteriormente, tendo como objetivo reduzi-lo para valores inferiores a 1 segundo.

Não esquecendo os espetáculos de música de câmara e sinfónica, em que se pretende valores de tempos de reverberação mais elevados, com uma majoração do TR das baixas frequências, era necessário criar dispositivos que pudessem variar também a reverberação das altas e médias frequências.

O quadro 6.18 sintetiza quais os objetivos em termos dos valores dos tempos de reverberação ideais em relação aos apresentados no quadro 6.17, para cada atividade prevista no futuro cartaz do auditório do cineteatro de Esmoriz.

Quadro 6.18 - Quadro síntese dos objetivos em termos de valores do tempo de reverberação para cada tipo de atividade que se venha a realizar futuramente no auditório do cineteatro de Esmoriz.

Função	Baixas Frequências	Médias e Altas Frequências
Música Pop/Rock	Baixar ligeiramente	Baixar ligeiramente
Palavra	Baixar brutalmente	Baixar ligeiramente
Música de Câmara e Sinfónica	Manter minimamente	Manter minimamente

Com o objetivo de se conseguir variabilidade nos valores do tempo de reverberação das baixas frequências, foi pensado um sistema que pudesse alternadamente ter como superfície exposta um material pouco absorvente e um material muito absorvente nessa gama de frequências.

Com base no modelo encontrado em “*Auditorium Acoustics and Architectural Design*” de M. Barron, [Barron] decidiu-se desenvolver um sistema composto por dois painéis sobrepostos, em que o do lado exterior seria em madeira maciça de pinho envernizado com espessura de 2 cm e o outro seria em contraplacado de 3 mm associado a uma caixa de ar de 150 mm preenchida com 75 mm de lã mineral. O objetivo passaria, através de algum sistema mecânico poder-se, por um lado usar o painel pouco absorvente de madeira (Figura 6.20) e por outro que se conseguisse “abrir” esse mesmo painel e tornar visível o contraplacado capaz de absorver as baixas frequências (Figura 6.21).

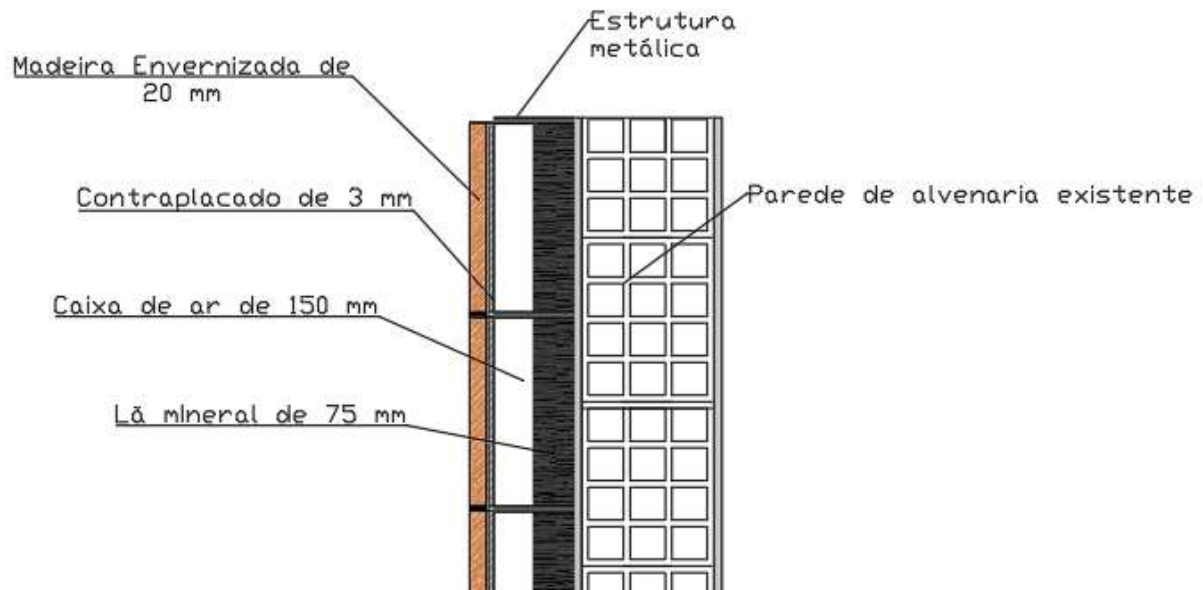


Figura 6.20 - Sistema constituído por painéis de madeira maciça envernizada de 20 mm e contraplacado de 3 mm associado a uma caixa de ar de 150 mm preenchida com 75 mm de lã mineral, com os primeiros fechados e a serem as superfícies de contacto das ondas sonoras recebidas.

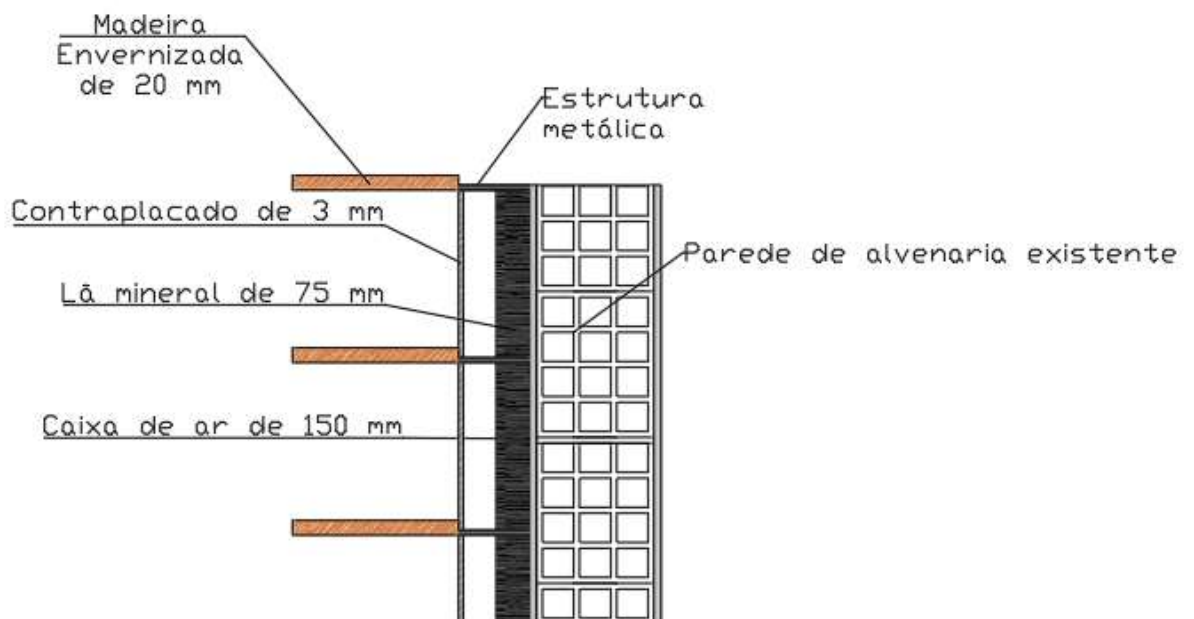


Figura 6.21 - Sistema constituído por painéis de madeira maciça envernizada de 20 mm e contraplacado de 3 mm associado a uma caixa de ar de 150 mm preenchida com 75 mm de lã mineral, com os primeiros abertos e a serem as superfícies de contraplacado a receber as ondas sonoras.

Convém referir, que quando os painéis de madeira estão abertos (Figura 6.21), além de existir a absorção sonora por parte do fino contraplacado, os primeiros teriam um feltro absorvente de fibra natural de 5 mm colado na face “escondida”, o que contribuiria também para uma melhor eficácia do sistema.

Estes sistemas seriam colocados nas paredes laterais do auditório na zona da plateia, de forma a conseguir-se uma grande área de superfície capaz de oferecer uma significativa variabilidade do tempo de reverberação nas baixas frequências.

As paredes laterais traseiras são paralelas entre si, pelo que deve anular-se o possível efeito dos ecos repetidos (*flutter echo*). Foi decidido, portanto que nessas paredes, ao invés de colocar painéis de madeira lisos se iriam colocar painéis de madeira com efeito difusor da *Ideatec* (Figura 6.10), tal como foram utilizados nas paredes traseiras do auditório.

Foi ainda pensado um modelo com os mesmos princípios do anterior, mas com os painéis de madeira a moverem-se lateralmente (uma espécie de porta de correr) e a proporcionarem a vista ou não do contraplacado aplicado interiormente. Será também composto por painéis de madeira maciça de pinho envernizado de 20 mm e por contraplacado de 3 mm associado a uma caixa de ar de 100 mm preenchida com 50 mm de lã mineral. Este sistema variável será utilizado nas paredes laterais que delimitam a bancada superior e está representado em corte vertical e horizontal nas figuras 6.22 e 6.23, respetivamente.

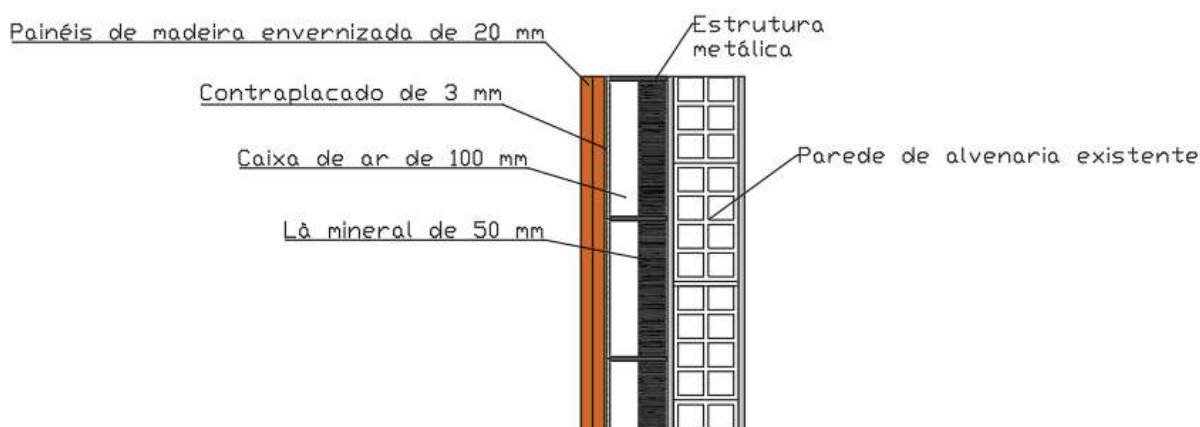


Figura 6.22 - Corte construtivo vertical do sistema composto por painéis de madeira de 20 mm e de contraplacado de 3 mm associado a uma caixa de ar de 100 mm preenchida com 50 mm de lã mineral, colocados nas paredes laterais que delimitam a bancada superior.

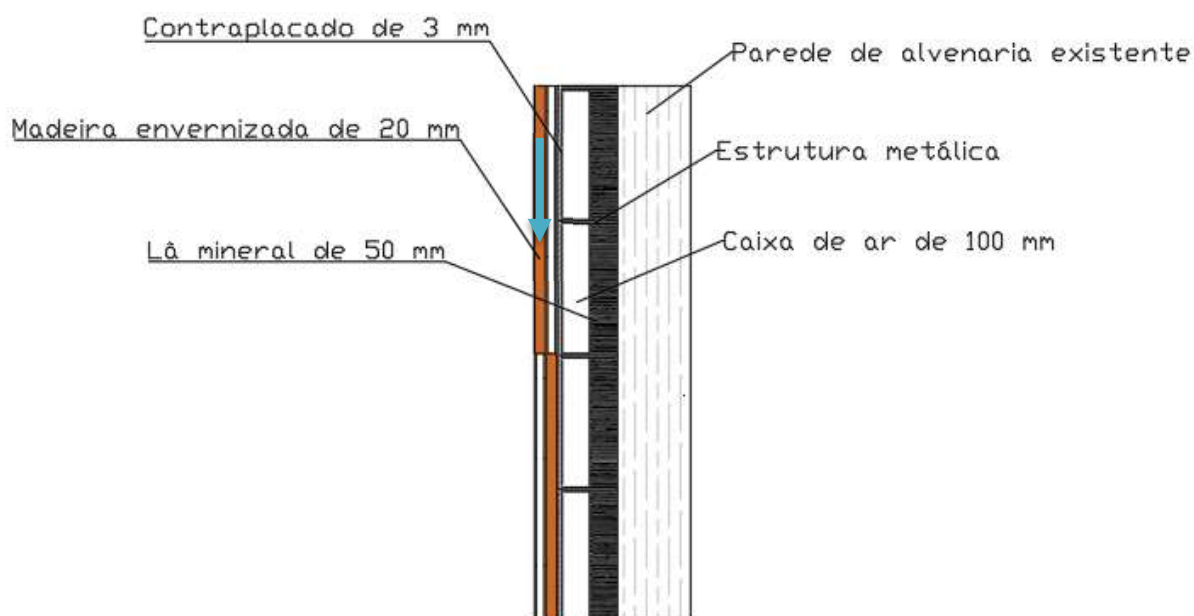


Figura 6.23 - Corte construtivo horizontal do sistema composto por painéis de madeira de 20mm e de contraplacado de 3 mm associado a uma caixa de ar de 100 mm preenchida com 50 mm de lã mineral, colocados nas paredes laterais que delimitam a bancada superior (situação de painéis de madeira fechados).

O quadro 6.19 apresenta os valores da absorção sonora equivalente calculados através da expressão (6.12) dos painéis de madeira envernizada numa situação (Situação 1) em que estão completamente fechados nos dois sistemas apresentados anteriormente. Estando todos os painéis de madeira com as superfícies expostas, estes perfazem uma área total de 363 m².

$$A_{\text{situação 1}} = (\alpha_{\text{painéis de madeira}} - \alpha_{\text{alvenaria}}) * S_{\text{painéis de madeira}} \quad (\text{m}^2) \quad (6.12)$$

Quadro 6.19 - Valores da absorção sonora dos sistemas acusticamente variáveis, numa situação (Situação 1) em que os painéis de madeira estão completamente fechados, sem existir influência de absorção sonora do contraplacado.

Situação 1				
Banda de Frequência (Hz)	$\alpha_{\text{painéis madeira}}$	$\alpha_{\text{alvenaria}}$	$S_{\text{painéis madeira}} (\text{m}^2)$	$A_{\text{situação 1}} (\text{m}^2)$
125	0,05	0,01	363	14,5
250	0,04	0,01		10,9
500	0,03	0,01		7,3
1000	0,03	0,02		3,6
2000	0,03	0,02		3,6
4000	0,02	0,03		- 3,6*

*O valor da absorção sonora equivalente encontra-se com sinal negativo, pois os painéis de madeira na banda de frequência de 4kHz possuem um coeficiente de absorção sonora menor que o da alvenaria, pelo que, na *fórmula de Sabine*, este valor terá de ser subtraído e não somado.

No quadro 6.20 estão apresentados os valores da absorção sonora equivalente, calculados através da expressão (6.13), dos dois sistemas acusticamente variáveis apresentados anteriormente numa situação (Situação 2) em que os painéis de madeira estão completamente abertos e que, por consequência, as superfícies de contraplacado ficam expostas. Nesta disposição, a área de superfície de madeira envernizada perfaz um total de 335 m², as de contraplacado, 335 m² e a de superfície de madeira revestida com feltro de fibra natural, 307 m².

$$A_{\text{situação 2}} = (\alpha_{\text{contraplacado}} - \alpha_{\text{alvenaria}}) * S_{\text{contraplacado}} + \alpha_{\text{painéis de madeira}} * S_{\text{painéis de madeira}} + \alpha_{\text{feltro}} * S_{\text{feltro}} \quad (6.13)$$

Quadro 6.20 - Valores da absorção sonora dos sistemas acusticamente variáveis, numa situação (Situação 2) em que os painéis de madeira estão completamente abertos, existindo a influência de absorção sonora do contraplacado e do feltro absorvente de fibra natural colado na face "escondida" dos painéis de madeira.

Situação 2								
Banda de Frequência (Hz)	$\alpha_{\text{contraplacado}}$	$\alpha_{\text{alvenaria}}$	$S_{\text{contraplacado}} (m^2)$	$\alpha_{\text{painéis madeira}}$	$S_{\text{painéis madeira}} (m^2)$	α_{feltro}	$S_{\text{feltro}} (m^2)$	$A_{\text{situação 2}} (m^2)$
125	0,50	0,01	335	0,05	335	0,09	307	208,5
250	0,30	0,01		0,04		0,12		147,4
500	0,10	0,01		0,03		0,18		95,5
1000	0,05	0,02		0,03		0,30		112,2
2000	0,05	0,02		0,03		0,55		189,0
4000	0,05	0,03		0,02		0,59		194,5

Tal como foi referido anteriormente, é também necessário fazer variar os valores do tempo de reverberação das médias e altas frequências.

Como ideia mais prática e de fácil execução, foi pensada a colocação de cortinas que fossem fortemente absorventes, penduradas livremente sobre as paredes do auditório. As cortinas estariam estendidas quando se pretendesse um TR mais baixo e recolhidas quando se necessitasse de uma reverberação mais elevada.

De forma a conseguir-se uma área considerável de cortinas no auditório, foi decidido colocá-las nas paredes traseiras e em parte das paredes laterais da frente da sala, perfazendo uma área total de 186 m².

Com o objetivo de se conseguir variar significativamente os valores do tempo de reverberação das médias e altas frequências, foi escolhido um tipo de cortina que tivesse coeficientes de absorção sonora elevados. Por conseguinte, foi decidida a colocação de cortinas grossas de algodão, com uma área drapeada de 75% colocadas a cerca de 13 cm da parede.

Os valores da absorção sonora equivalente referentes à situação em que as cortinas estão completamente abertas, ocupando uma grande área das paredes do auditório, são dados pela expressão (6.14). Desta forma obtiveram-se os valores apresentados no quadro 6.21.

$$A_{\text{cortinas}} = (\alpha_{\text{cortinas}} - \alpha_{\text{alvenaria}}) * S_{\text{cortinas}} \quad (m^2) \quad (6.14)$$

Quadro 6.21 - Valores da absorção sonora equivalente (A) de cortinas grossas de algodão drapeadas, colocadas com um afastamento de 13 cm das paredes traseiras e laterais do auditório.

Cortinas de algodão drapeadas				
Banda de Frequência (Hz)	α_{cortinas}	$\alpha_{\text{alvenaria}}$	$S_{\text{cortinas}} (\text{m}^2)$	$A_{\text{cortinas}} (\text{m}^2)$
125	0,30	0,01	186	53,9
250	0,45	0,01		81,8
500	0,65	0,01		119,0
1000	0,56	0,02		100,4
2000	0,59	0,02		106,0
4000	0,71	0,03		126,5

A escolha entre a Situação 1 ou 2 e o uso ou não das cortinas estendidas será dependente do tipo de utilização que o auditório terá, pois, como foi referido anteriormente, obter-se-ão diferentes valores dos tempos de reverberação em todas as bandas de 1/1 oitava de frequências.

O quadro 6.22, em forma de síntese, mostra que combinações serão mais eficazes para se conseguir aproximar o auditório dos valores do tempo de reverberação ideais para cada função.

Quadro 6.22 - Quadro síntese das melhores combinações que resultam em tempos de reverberação idealmente melhores em função do tipo de utilização do auditório.

Função	Cortinas		Situação 1	Situação 2
	Estendidas	Recolhidas		
Teatro/Cinema/Conferências (Palavra)	X			X
Música Pop/Rock	X		X	
Música de Câmara e Sinfónica		X	X	

Para atividades onde se deve privilegiar a *palavra* deve então optar-se por abrir as cortinas e usar a máxima área possível de contraplacado e de feltro absorvente de fibra natural (*Situação 2*) de forma a baixar os tempos de reverberação nas baixas, médias e altas frequências.

Em espetáculos musicais *Pop/Rock* optar-se-á por manter as cortinas abertas e utilizar a situação em que o contraplacado fica escondido por detrás dos painéis de madeira (*Situação 1*)

Para concertos de música de *Câmara e Sinfónica*, deve fechar-se as cortinas e evitar a absorção sonora do contraplacado (*Situação 1*).

Os valores do tempo de reverberação para atividades relacionadas com a *palavra*, serão calculados a partir da *fórmula de Sabine* (6.15), considerando um volume de 8574 m³ e somando os valores da absorção sonora equivalente anteriores (quadro 6.17) com os referentes aos sistemas acusticamente variáveis, obtendo-se os valores apresentados no quadro 6.23.

$$TR = \frac{0,16 * 8574}{A_{anterior} + A_{cortinas} + A_{situação2}} \quad (s) \quad (6.15)$$

Quadro 6.23 - Valores finais dos tempos de reverberação por frequências em badas de 1/1 oitava para espetáculos em que se deve privilegiar a palavra (*Teatro, Cinema* e conferências).

Banda de Frequência (Hz)	A _{anterior} (m ²)	A _{cortinas} (m ²)	A _{situação2} (m ²)	A _{total} (m ²)	TR (s)
125	1003	53,9	196,3	1265	1,08
250	1230	81,8	122,8	1459	0,94
500	1287	119,0	49,4	1501	0,91
1000	1248	100,4	29,3	1460	0,94
2000	1189	106,0	29,3	1484	0,92
4000	1292	126,5	19,5	1613	0,85

Os valores do tempo de reverberação para espetáculos de música *Pop/Rock* serão calculados a partir da *fórmula de Sabine* (6.16), considerando um volume de 8574 m³ e somando os valores da absorção sonora equivalente anteriores (quadro 6.17) com os referentes aos sistemas acusticamente variáveis, obtendo-se os valores apresentados no quadro 6.24.

$$TR = \frac{0,16 * 8574}{A_{anterior} + A_{cortinas} + A_{situação1}} \quad (s) \quad (6.16)$$

Quadro 6.24 - Valores finais dos tempos de reverberação por frequências em badas de 1/1 oitava para espetáculos de música *Pop/Rock*.

Banda de Frequência (Hz)	A _{anterior} (m ²)	A _{cortinas} (m ²)	A _{situação1} (m ²)	A _{total} (m ²)	TR (s)
125	1003	53,9	14,5	1092	1,26
250	1230	81,8	10,9	1321	1,04
500	1287	119,0	7,3	1410	0,97
1000	1248	100,4	3,6	1358	1,01
2000	1189	106,0	3,6	1306	1,05
4000	1292	126,5	- 3,6*	1420,9	0,96

*O valor da absorção sonora equivalente encontra-se com sinal negativo, pois os painéis de madeira na banda de frequência de 4kHz possuem um coeficiente de absorção sonora menor que o da alvenaria, pelo que, na *fórmula de Sabine*, este valor terá de ser subtraído e não somado.

Os valores do tempo de reverberação para concertos de música de *Câmara* e concertos de música *Sinfónica*, serão calculados a partir da *fórmula de Sabine* (6.17), considerando um volume de 8574 m³ e somando os valores da absorção sonora equivalente anteriores (quadro 6.17) com os referentes aos sistemas acusticamente variáveis, obtendo-se os valores apresentados no quadro 6.25.

$$TR = \frac{0,16 * 8574}{A_{anterior} + A_{situação1}} \quad (s) \quad (6.17)$$

Quadro 6.25 - Valores finais dos tempos de reverberação por frequências em bandas de 1/1 oitava para espetáculos de música de Câmara e Sinfónica.

Banda de Frequência (Hz)	Aanterior (m ²)	Asituação1 (m ²)	Atotal (m ²)	TR (s)
125	1003	14,5	1039	1,32
250	1230	10,9	1239	1,11
500	1287	7,3	1291	1,06
1000	1248	3,6	1258	1,09
2000	1189	3,6	1200	1,14
4000	1292	- 3,6*	1294	1,06

*O valor da absorção sonora equivalente encontra-se com sinal negativo, pois os painéis de madeira na banda de frequência de 4kHz possuem um coeficiente de absorção sonora menor que o da alvenaria, pelo que, na *fórmula de Sabine*, este valor terá de ser subtraído e não somado.

Fazendo uma análise dos valores do tempo de reverberação obtidos com este projeto de acústica variável, conclui-se que os objetivos iniciais são cumpridos.

Em atividades relacionadas com a palavra consegue-se chegar a valores de *TR* abaixo de 1 segundo em praticamente todas as bandas de frequência de 1/1 oitava, sendo que nas frequências centrais de 500, 1000 e 2000 Hz, obteve-se um *TR* médio de 0,9 segundos.

Para espetáculos de música *Pop/Rock* também se conseguiram valores de *TR* abaixo de 1 segundo nas médias e altas frequências com uma majoração de cerca de x1,25 na banda de oitava da frequência mais baixa de 125 Hz (1,23 segundos). Conseguiu-se um *TR* médio, referente às frequências de 500, 1000 e 2000 Hz, de 1,0 segundos.

Em relação a concertos de música de *Câmara* e concertos de música *Sinfónica*, conseguiram-se valores de *TR* mais elevados em todas as bandas de oitava de frequência, em relação às restantes atividades, também com uma majoração próxima de x1,25, referente à banda dos 125 Hz. O *TR* médio das frequências de 500, 1000 e 2000 Hz foi de 1,1 segundos. Esta foi a atividade que ficou mais aquém dos *TR* que seriam ideais para uma acústica confortavelmente melhor, pois eram necessários valores mais elevados.

No cumprimento da legislação referente ao *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE)*, o auditório com um volume de 8574 m³ deverá ter um *TR* médio (média do *TR* dos 500, 1000 e 2000 Hz) inferior ao valor obtido através da expressão (6.18), associado a uma incerteza de 35 %.

$$TR_{médio} \leq 0,32 + 0,17 * \log(8574) = 0,99 \text{ s} \quad (6.18)$$

Associando o valor limite do tempo de reverberação médio, definido pelo *RRAE*, a uma incerteza de 35%, resulta que o auditório do cineteatro de Esmoriz deverá ter um TR médio inferior a 1,34 segundos, pelo que se pode concluir que o projeto realizado está dentro dos limites legais.

Os próximos cortes e vistas das figuras 6.24 a 6.31, mostram a configuração do auditório com o projeto de acústica variável que foi estudado neste presente trabalho.

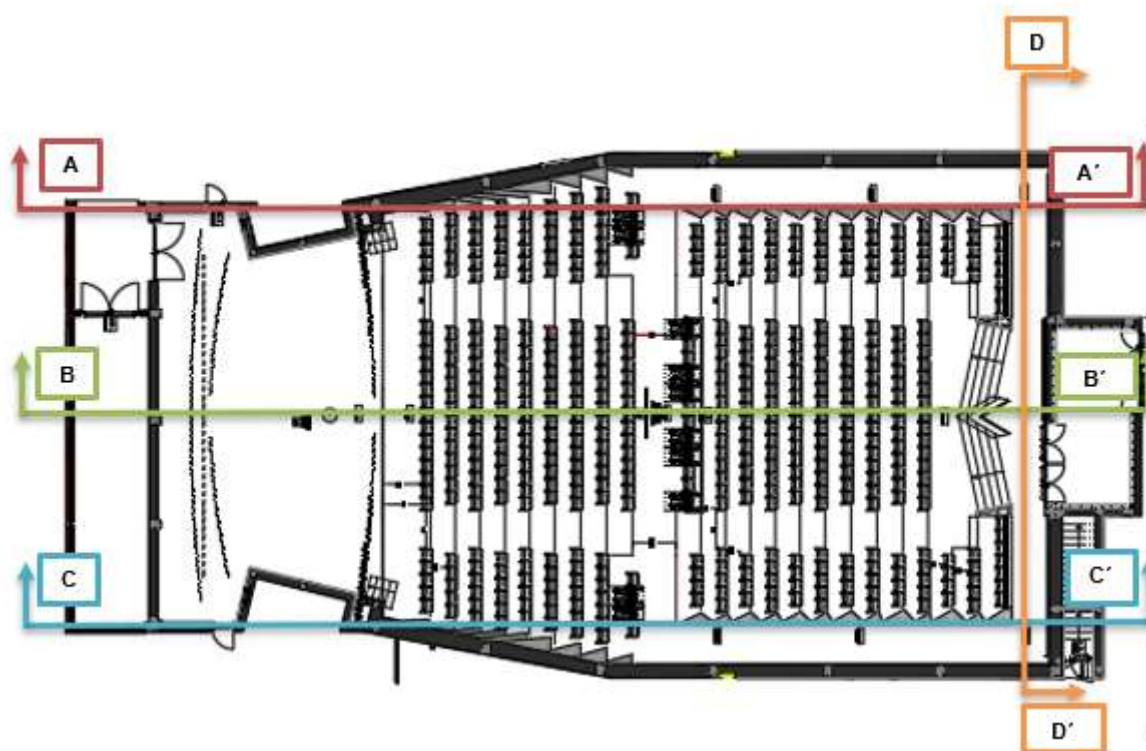


Figura 6.24 - Planta do auditório do cineteatro de Esmoriz com a representação de quatro cortes verticais.

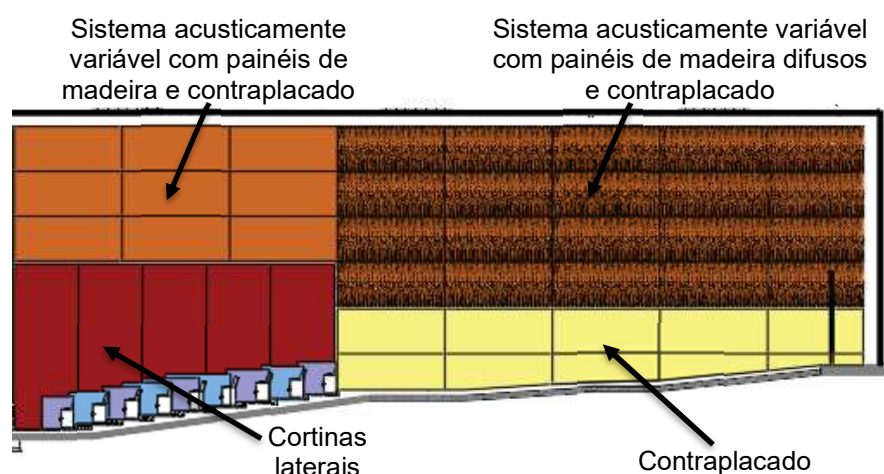


Figura 6.25 - Corte AA' do auditório do cineteatro de Esmoriz.

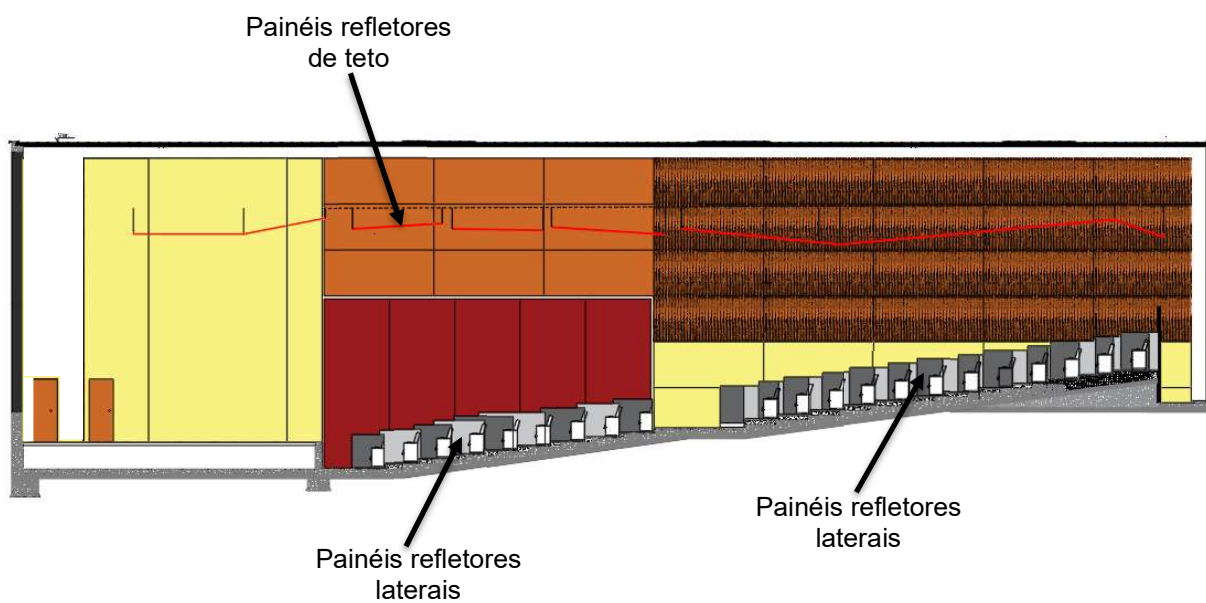


Figura 6.26 - Corte BB' do auditório do cineteatro de Esmoriz.

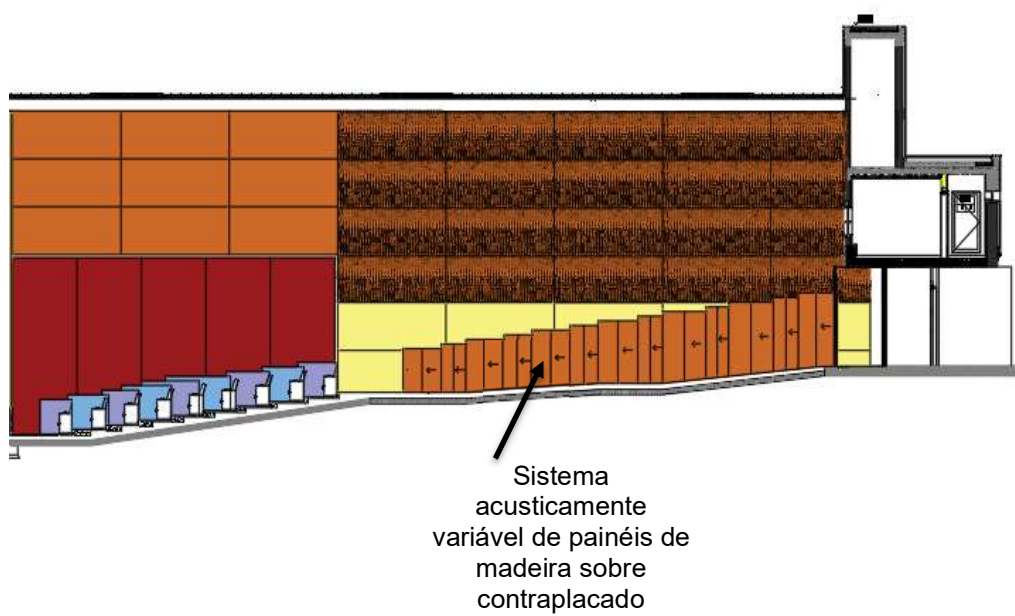


Figura 6.27 - Corte CC' do auditório do cineteatro de Esmoriz.

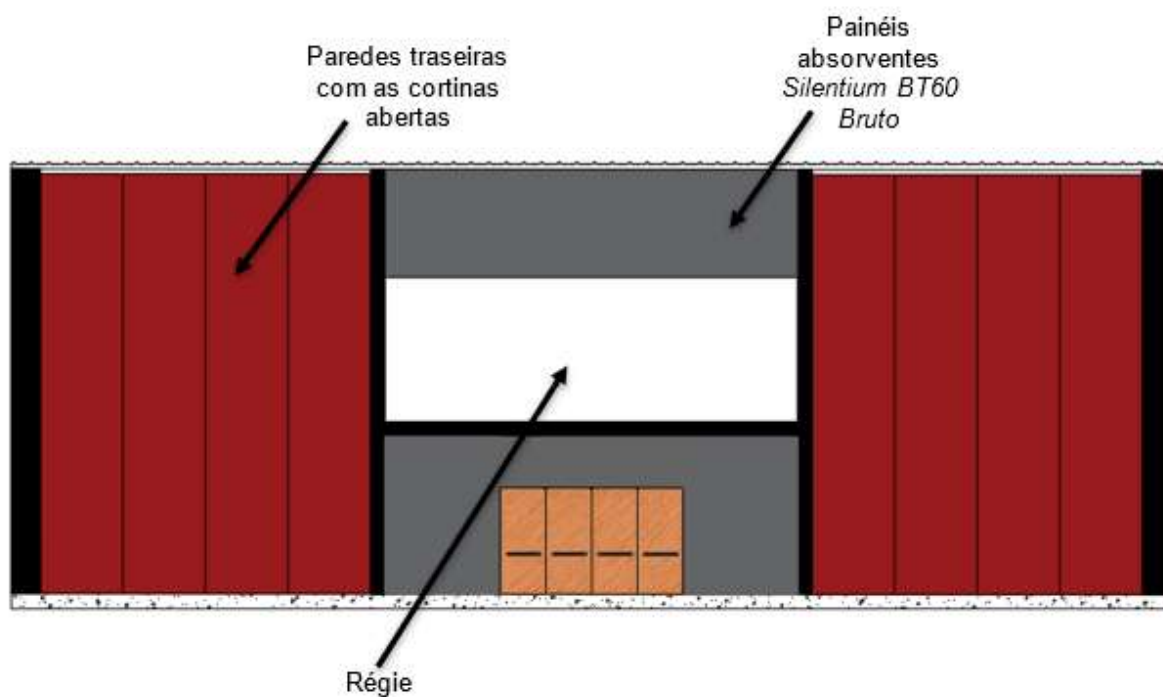


Figura 6.28 - Corte DD' do auditório do cineteatro de Esmoriz.

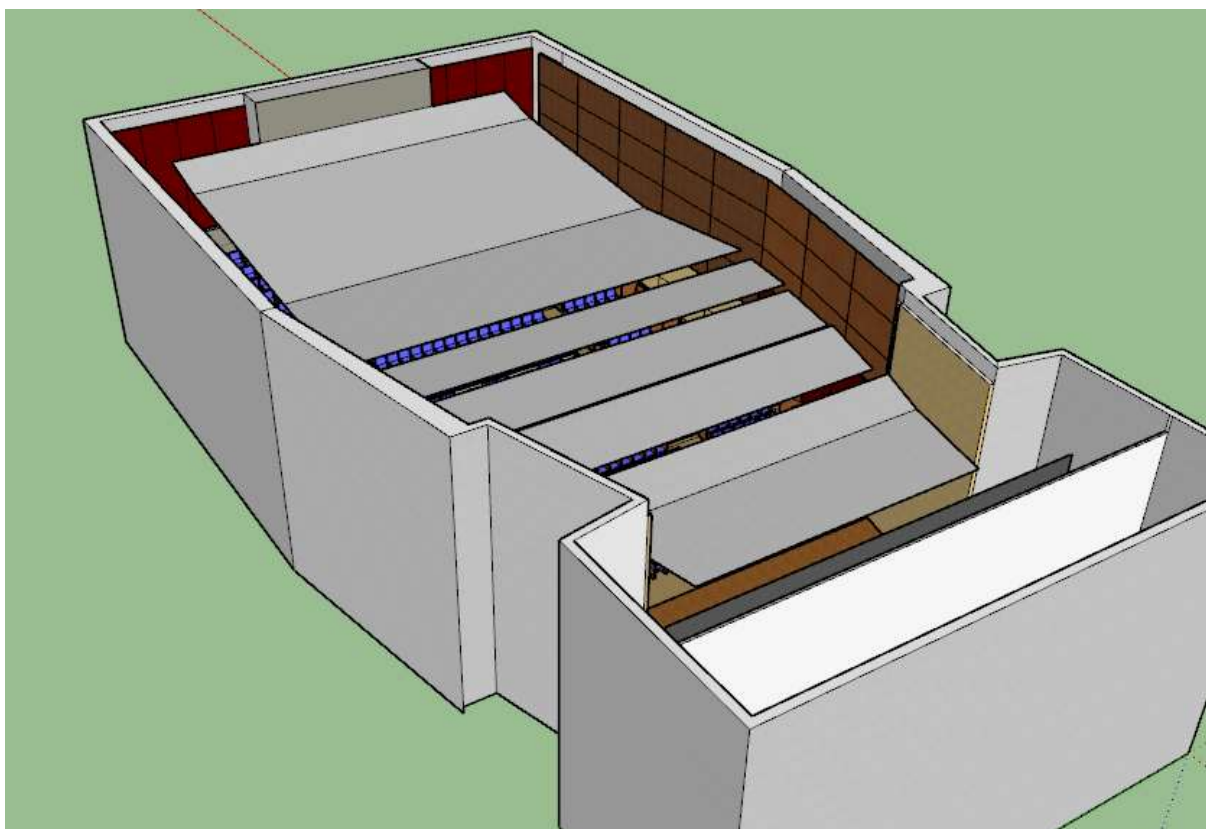


Figura 6.29 - Vista superior em 3D do auditório do cineteatro de Esmoriz onde é possível ver o teto refletor em gesso cartonado.

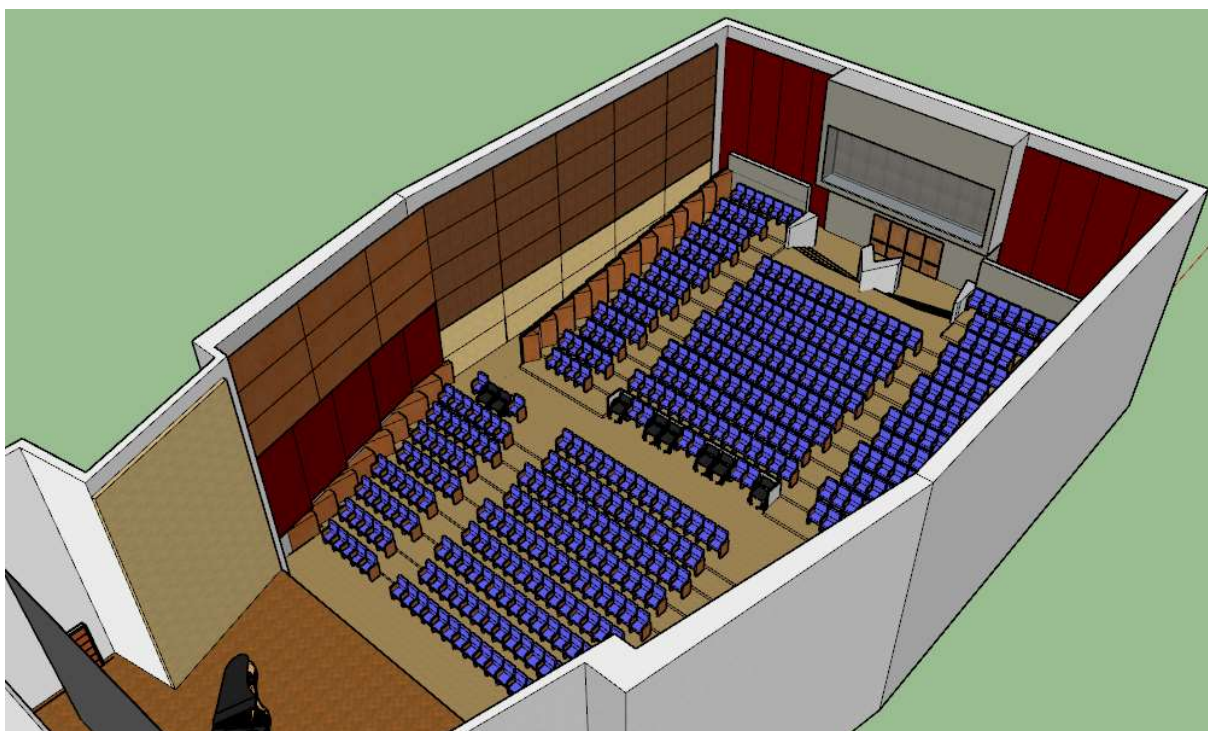


Figura 6.30 - Vista superior em 3D em que é possível ver o interior do auditório e os respetivos materiais acústicos.

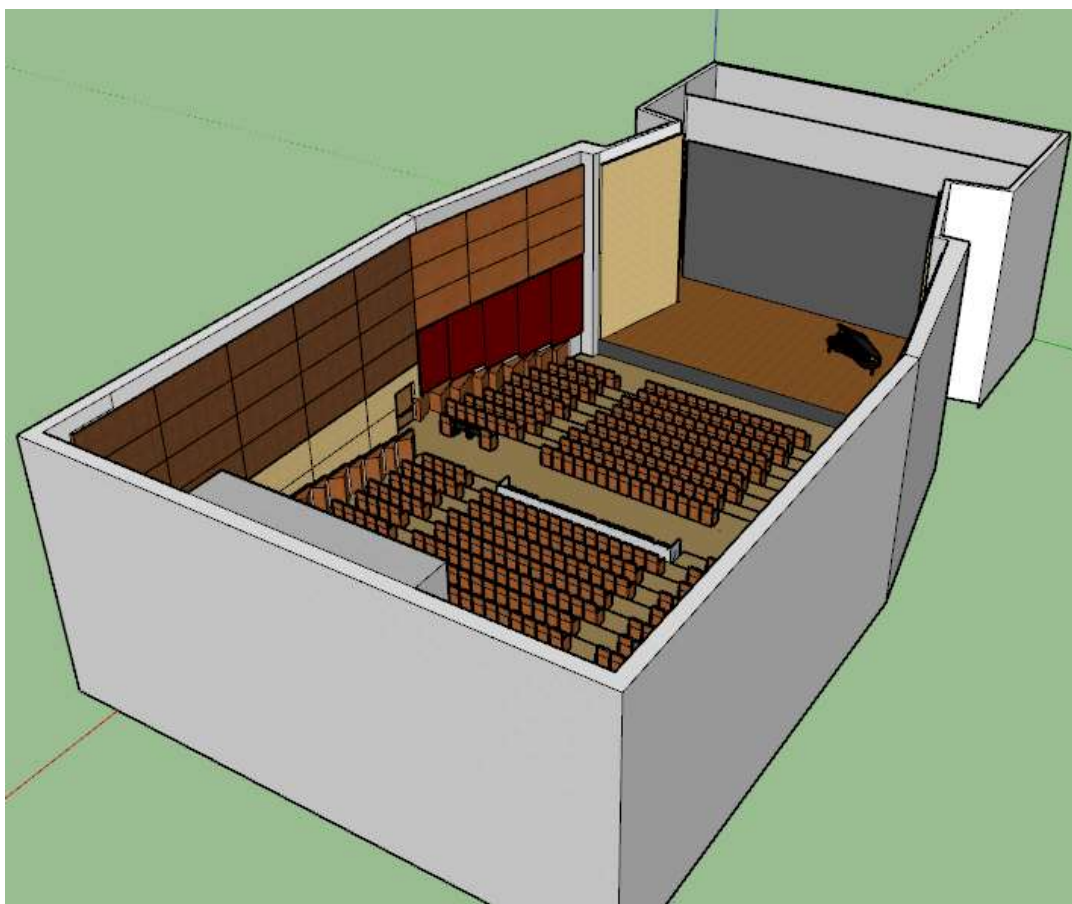


Figura 6.31 - Vista frontal superior em 3D em que é possível ver a zona do palco e a porta de emergência a meio da parede lateral.

6.2. ISOLAMENTO SONORO

6.2.1. IDENTIFICAÇÃO DE PROBLEMAS

Existem três pontos problemáticos de ruído que podem criar incomodidade no público presente no auditório aquando da exibição de um espetáculo. Esses ruídos precisam de ser estudados e controlados através de dispositivos e sistemas que os eliminem significativamente.

Os pontos de ruído que precisam de ser acusticamente isoladas dizem respeito a:

- AVAC (incluindo todos os sistemas e dispositivos importantes para o seu funcionamento);
- ruído dos *foyers* envolventes ao auditório (incluindo o ruído da cafetaria aí existente);
- ruído proveniente dos camarins e instalações sanitárias próximos da zona do palco.

Em relação ao sistema de ventilação, existem vários pontos que se precisavam de atenção. Por consulta do projeto de AVAC verificou-se que a climatização/ventilação do auditório iria ser realizado por uma Bomba de Calor colocada na zona da cobertura, ao ar livre, sobre o *foyer* central. O equipamento a ser utilizado será da marca *Lennox*, modelo *Rooftop Heat Pump Unit Energy (EO14 AH 065)* (Figura 6.32). Esta unidade *rooftop* de elevada eficiência será responsável pela insuflação e extração do ar do auditório.



Figura 6.32 - Unidade *rooftop* de alta eficiência (Bomba de Calor) da marca *Lennox*, modelo *Rooftop Heat Pump Unit Energy (EO14 AH 065)* [56].

No local onde será colocada a unidade *rooftop*, também serão instaladas duas unidades de tratamento de ar (UTA), responsáveis por ventilar os restantes espaços do edifício Esmoriztur. Estes três equipamentos podem provocar ruídos indesejáveis no auditório através do nível de potência sonora produzido e pelas vibrações que possam ser induzidas na laje sobre o qual estão pousados e que intersesta uma das paredes (parede traseira) do auditório (Figuras 6.33 e 6.34).

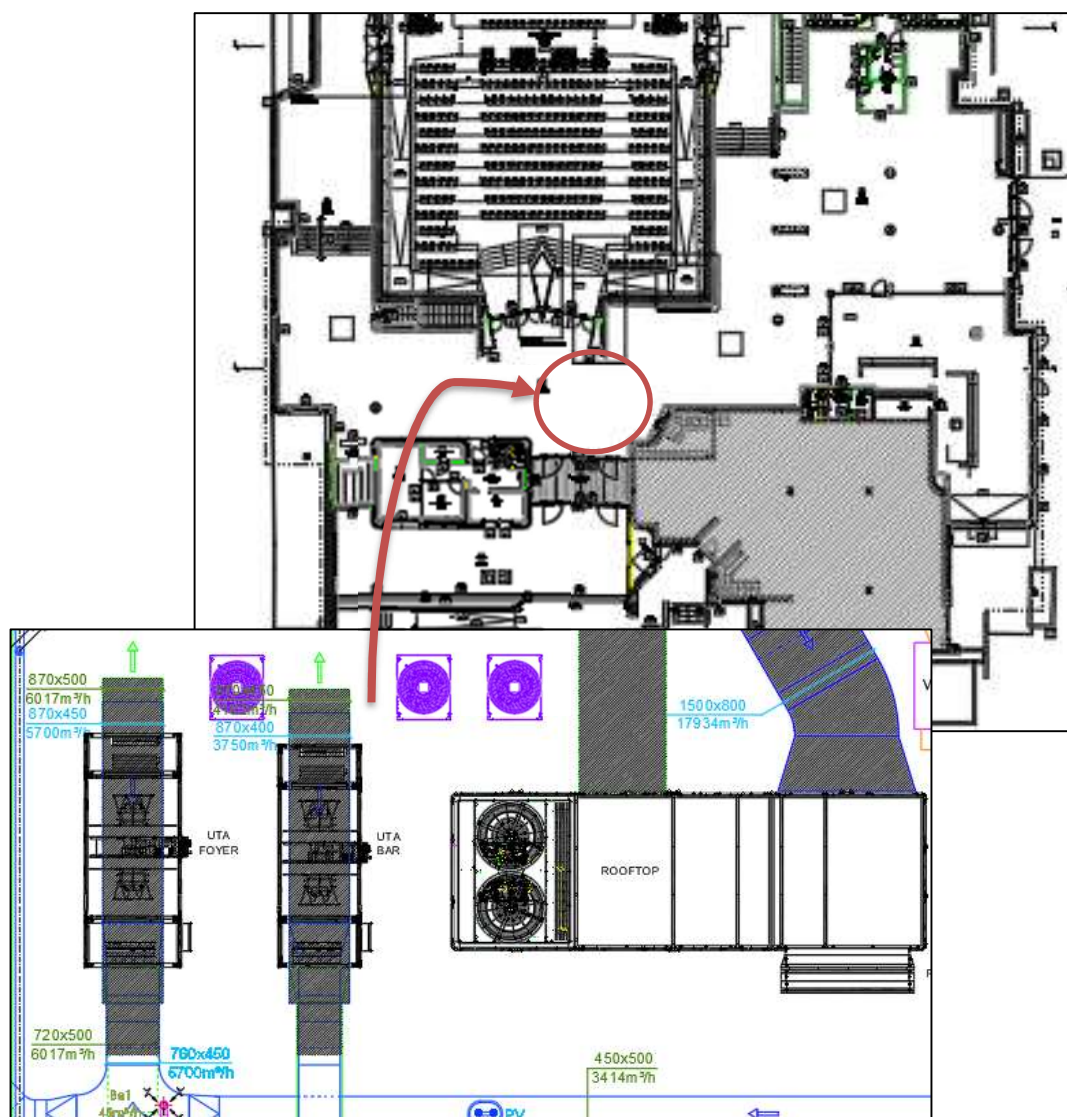


Figura 6.33 - Localização na cobertura das unidades de tratamento de ar e da unidade *rooftop* de bomba de calor (planta).



Figura 6.34 - Localização das unidades de tratamento de ar e da unidade *rooftop* de bomba de calor na cobertura (alçado).

O sistema de ventilação do auditório é composto por 14 difusores colocados no teto responsáveis pela insuflação de ar proveniente da bomba de calor a partir de condutas. O processo de extração de ar faz-se através de 18 extratores localizados na base das paredes laterais até à bomba de calor.

As condutas passam no auditório acima do teto refletor e são suportadas por uma estrutura metálica. O funcionamento da bomba de calor produz um elevado ruído que é percorrido ao longo das condutas até ao auditório através dos difusores e dos extratores. Além do ruído produzido pela unidade *rooftop*, é necessário ter em atenção as vibrações que as condutas pousadas na estrutura metálica podem causar quando o sistema de ventilação está em funcionamento.

É também importante referir que as condutas provenientes do equipamento localizado na cobertura, atravessam a parede traseira do auditório pelo que podem originar ruídos inconvenientes dentro da sala.

Poderá haver, também, problemas de ruído inerentes às atividades em funcionamento na zona envolvente do auditório, nomeadamente nos *foyers*. Os elementos construtivos que fazem a separação destes espaços deverão ter um bom isolamento sonoro, visto que, como já foi referido, os *foyers* poderão funcionar como um espaço extra para a realização de algumas atividades em simultâneo de outras, dentro do auditório. Ruídos provenientes do funcionamento da cafetaria, também na zona do *foyer* nascente terá de ser tido em atenção.

Na zona do palco, as paredes laterais fazem a separação entre este e os camarins e instalações sanitárias, em ambos os lados. Além dos ruídos normais do funcionamento destes espaços, deve ter-se em consideração as vibrações que as tubagens hidráulicas podem causar no cruzamento com elementos construtivos.

Tendo em conta o tipo de espaço que estamos a tratar neste projeto deve tentar-se assegurar curvas de incomodidade (*NC*) no máximo até *NC-30*, sendo que se teria excelentes condições acústicas para curvas inferiores a *NC-20*.

6.2.2. RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS

6.2.2.1. Ruídos do sistema de ventilação (AVAC)

Com vista a minimizar/eliminar os ruídos provenientes de vibrações provocadas pelos equipamentos dispostos na cobertura, ao ar livre, foi decido construir pequenas lajes de inércia (Figura 6.35) onde estes serão colocados. Este sistema faz limitar as deslocacões e facilita o isolamento das vibrações. Para um correto dimensionamento, estes blocos de inércia deverão ter entre duas a três vezes o peso do equipamento que irá suportar, com uma espessura de 10 a 15 cm. As lajes de inércia não deverão pousar diretamente na laje, neste caso da cobertura, pelo que é necessária a utilização de elementos resilientes capazes de isolar a vibração provocada pela máquina [1].

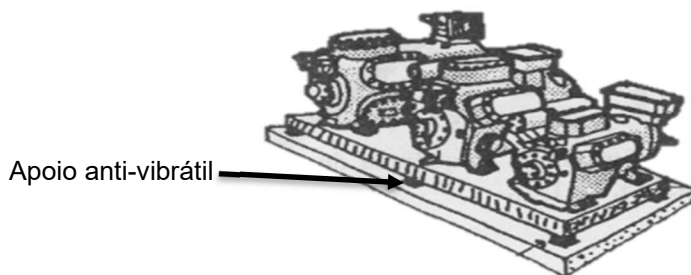


Figura 6.35 - Exemplo de uma laje de inércia utilizada para eliminar vibrações dos elementos construtivos onde são instalados equipamentos ruidosos [1].

Sabendo que o equipamento referente à bomba de calor tem as dimensões apresentadas na figura 6.36, foi decidido criar uma laje de inércia em betão armado com uma plataforma de 2,50x6,40 m com uma espessura de 10 cm ($1,6 \text{ m}^3$). Tendo em conta que a massa volúmica do betão armado é de cerca de 2500 kg/m^3 , com as dimensões referidas acima, perfaz na totalidade uma massa específica de 4000 kg.

A massa específica da unidade *rooftop* é de 1492 kg, pelo que a laje dimensionada vai de encontro à boa prática, de que esta deverá ter um peso entre 2 a 3 vezes superior ao peso do equipamento.

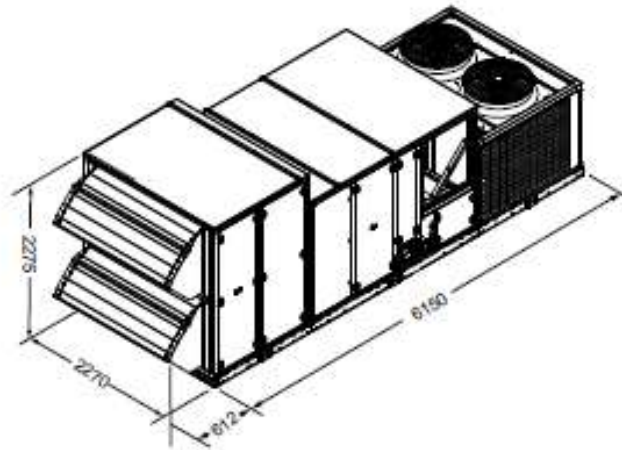


Figura 6.36 - Dimensões da unidade *rooftop* a ser colocada na cobertura do edifício do cineteatro de Esmoriz [56].

Em relação aos dispositivos resilientes que serão colocados entre a plataforma de inércia e a laje da cobertura, foi decidido utilizar apoios anti-vibráteis de borracha pois são aqueles que respondem melhor a uma gama maior de frequência. Os dispositivos selecionados são da marca *Christie & Grey Limited* (Figura 6.37).



Figura 6.37 - Apoios anti-vibráteis da marca *Christie & Grey Limited* a colocar sob a laje de inércia [57].

Para uma correta seleção do tipo de apoios anti-vibráteis que se devem usar, recorreu-se a um ábaco que relaciona a frequência de operação do equipamento em função das rotações por minuto (rpm) do mesmo (Figura 6.38). Sabendo que o número máximo de rotações por minuto da unidade *rooftop* é de cerca de 2920 rpm, e tomando como referência a linha que serve a maior parte das aplicações, obtém-se a deflexão mínima necessária que os apoios anti-vibráteis terão de ter. Traçando as duas retas a vermelho, percebe-se que é necessária uma deflexão obrigatória de aproximadamente 0,13 (3,3 mm).

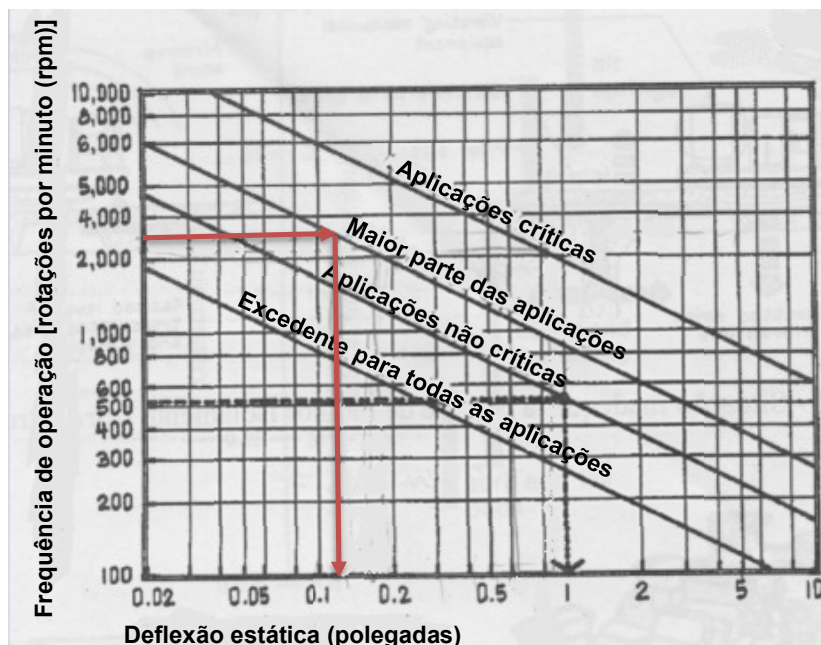


Figura 6.38 - Ábaco para obtenção da deflexão estática em função da frequência de operação da unidade *rooftop* colocada na cobertura do edifício do cineteatro de Esmoriz [1].

Consultando os ábacos referentes aos apoios anti-vibráteis da marca *Christie & Grey Limited* (Figura 6.39), escolheu-se o tipo de apoio mais indicado a ser utilizado e a carga que este pode suportar.

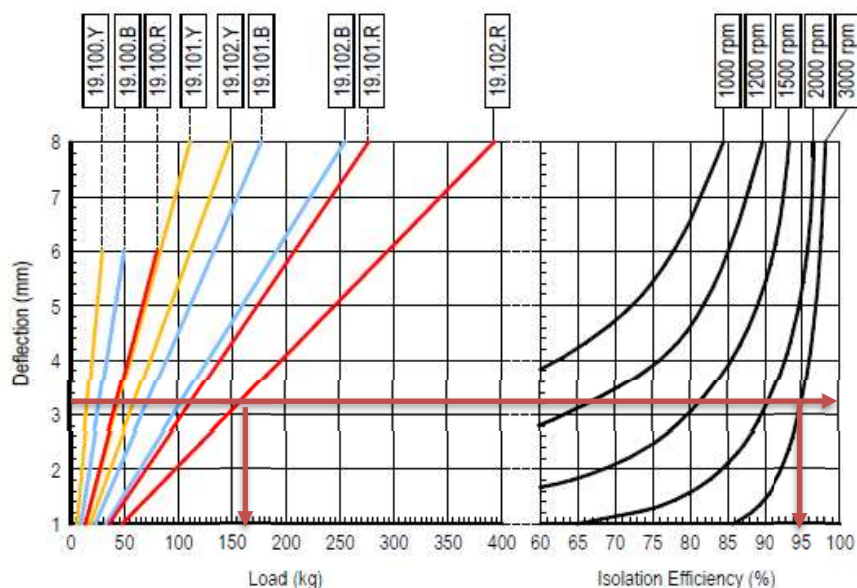


Figura 6.39 - Ábacos dos apoios anti-vibráteis de borracha da marca *Christie & Grey Limited* [57].

Utilizando um apoio anti-vibrátil, modelo *19.102.R*, percebe-se que a carga máxima que cada apoio pode suportar para uma deflexão de 3,3 milímetros é de cerca de 175 kg por apoio com uma eficiência de isolamento sonoro de 95%.

Tendo em conta a massa volúmica do betão armado de 2500 kg/m^3 , percebe-se que para um volume da laje de inércia de $1,6 \text{ m}^3$, resulta uma massa específica de 4000 kg. Somando o peso da laje com o da unidade *rooftop* (1492 kg), tem-se um total de 5492 kg que resulta num valor de 343 kg/m^2 .

Sabendo que os apoios anti-vibráteis centrais da laje de inércia serão os que vão estar sujeitos a uma maior carga, serão necessários 45 apoios (9×5) para que estes, numa área de $0,5 \text{ m}^2$, suportem 172 kg, valor inferior aos 175 kg por apoio, retirado do ábaco da figura 6.39. No comprimento de 6,4 metros da laje de inércia serão colocados apoios anti-vibráteis a cada 71 centímetros e na largura de 2,5 metros, a cada 50 centímetros.

O dimensionamento das lajes de inércia onde serão colocadas as unidades de tratamento de ar (UTA), responsáveis pela ventilação dos restantes espaços do edifício do cineteatro de Esmoriz é realizado da mesma forma. Consultando o projeto de ventilação, verificou-se que seriam utilizados duas UTA da marca *Lennox*, modelo *CompactAir Advanced CAMH035*. A dimensão deste equipamento é de 0,895 metros de largura e 1,445 metros de comprimento com um peso de 429 kg.

Foi decidida propor a construção de uma laje de inércia de dimensões $1,80 \times 1,3$ metros e uma espessura de 15 cm, que, tendo em conta a massa volúmica do betão armado de 2500 kg/m^3 , perfaz um peso total de 878 kg, cumprindo a boa prática de que a laje deve de ter um peso superior a duas, três vezes o peso do equipamento que suporta.

O número máximo de rotações da unidade de tratamento de ar é de 2270 rpm, pelo que, recorrendo ao ábaco da figura 6.40, obriga a uma deflexão dos apoios anti-vibráteis de 0,17 polegadas (4,3 mm)

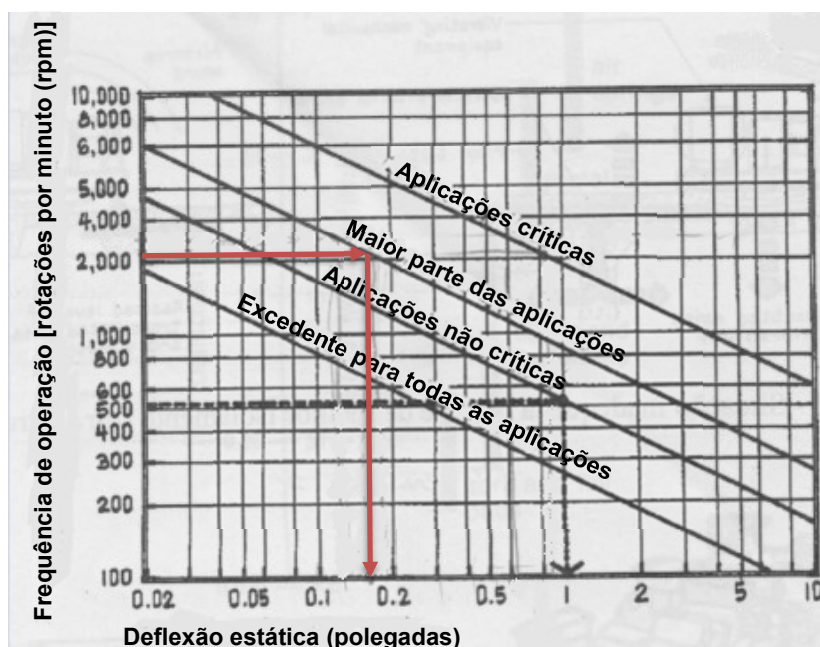


Figura 6.40 - Ábaco para obtenção da deflexão estática em função da frequência de operação da unidade de tratamento de ar colocada na cobertura do edifício do cineteatro de Esmoriz [1].

Consultando novamente os ábacos dos apoios anti-vibráteis da marca *Christie & Grey Limited* (Figura 6.41), obtemos o modelo que oferece uma maior eficácia na eliminação das vibrações causadas pelas unidades de tratamento de ar e qual a carga que este pode suportar.

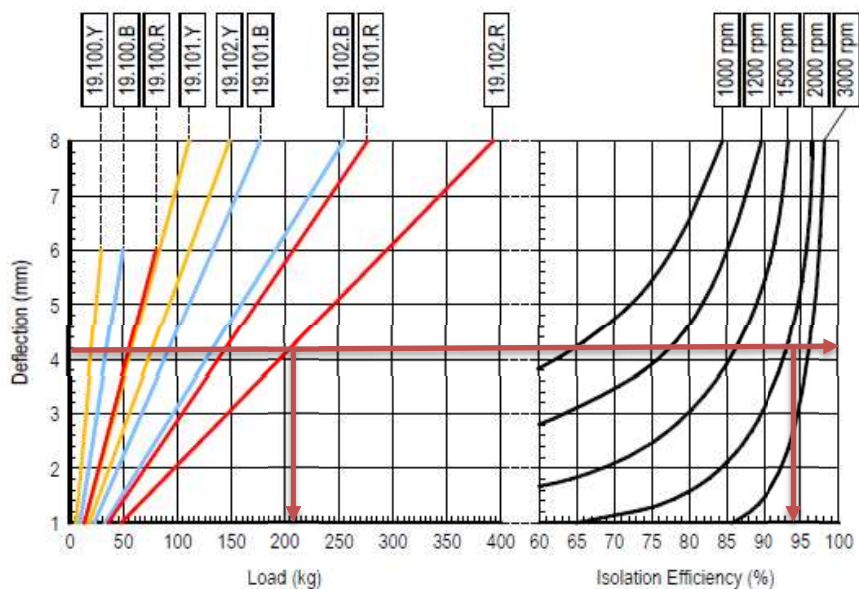


Figura 6.41 - Ábacos dos apoios anti-vibráteis de borracha da marca Christie & Grey Limited [57].

Para uma deflexão de 4,3 mm o apoio do modelo *19.102.R*, pode suportar cargas até, aproximadamente 210 kg, com uma eficiência de cerca de 94%.

Tendo em conta o peso da laje de inércia de 878 kg e o peso da UTA de 429 kg, perfaz um total de 1307 kg a serem suportados pelos apoios anti-vibráteis (559 kg/m^2).

Sabendo que os apoios anti-vibráteis centrais da laje de inércia serão os que vão estar sujeitos a uma maior carga, serão necessários 15 apoios (5×3), para que estes numa área de $0,29 \text{ m}^2$ suportem 162 kg, valor inferior aos 210 kg por apoio, retirado do ábaco da figura 6.41. No comprimento de 1,8 metros da laje de inércia serão colocados apoios anti-vibráteis a cada 45 centímetros e na largura de 1,3 metros, a cada 65 centímetros.

Outras situações que podem causar ruídos de vibrações indesejados será o atravessamento das condutas de ventilação pela parede traseira do auditório e o contacto destas com estrutura metálica que as suporta, localizada acima do teto refletor. Estas vibrações podem ser eliminadas através da utilização de mangas resilientes na primeira situação e de calços em borracha resiliente na segunda.

Os equipamentos de ventilação não produzem apenas vibrações, mas também altos níveis sonoros de ruído que poderão entrar pela parede traseira no auditório. Como tal, foi decidido isolar acusticamente essa zona com barreiras acústicas metálicas com lã de rocha do tipo *Alphafon* da marca *Alpha Acoustiki* (Figura 6.42) com um índice de redução sonora (R_w) de 35 dB para uma espessura de 10 centímetros.



Figura 6.42 - Barreira acústicas *Alphafon* da marca *Alpha Acoustiki* a colocar na zona dos equipamentos de ventilação [58].

Tendo em conta os níveis de pressão sonora produzidos pela unidade *rooftop* e pelas duas unidades de tratamento de ar (Quadro 6.26), percebe-se que a barreira acústica, só por si, não será suficiente para eliminar o ruído que possa entrar no auditório.

Quadro 6.26 - Nível de pressão sonora produzido pelos equipamentos de ventilação (uma unidade *rooftop* e duas unidades de tratamento de ar).

Equipamento	Nível de pressão sonora exterior a 1 m do equipamento (dB)	Nível de pressão sonora total (dB)
Unidade <i>rooftop</i>	91,0	$10\log(10^{9,1}+10^{9,02}+10^{9,02}) = 95,3$
Unidade de tratamento de ar	90,2	

A parede traseira do auditório que será o maior ponto de passagem de ruído proveniente dos equipamentos de ventilação servirá também de barreira sonora. A parede de 30 cm de espessura em alvenaria de tijolo rebocada apresenta um índice de redução sonora ponderado (R_w) de aproximadamente 54 dB, recorrendo ao procedimento de ajuste da curva real dos valores de R . Juntando a redução sonora da barreira acústica, referida anteriormente com a da parede, consegue-se anular eficazmente o ruído provocado pela unidade *rooftop* e pelas unidades de tratamento que poderia causar incómodo no auditório.

O ruído que é produzido no processo de insuflação e extração de ar, chega ao auditório através das condutas a partir da unidade *rooftop* (bomba de calor). Existem vários ruídos referentes a estes dois mecanismos de ventilação, mas o mais importante e o que acaba por mascarar os outros é o que provém do funcionamento do equipamento, portanto, será esse em que há que centrar as atenções.

O ruído vai sofrendo diferentes atenuações à medida que vai percorrendo as condutas de ventilação, sendo que estas acontecem nas seguintes situações:

- Atenuação devido à divisão de condutas;
- Atenuação devido à mudança da área da secção das condutas;
- Atenuação linear ao longo da conduta;
- Atenuação devido a curvas/cotovelos nas condutas;
- Atenuação devido às reflexões finais na conduta [59].

É, portanto, necessário consultar os níveis de potência sonora produzidos pela unidade *rooftop* de bomba de calor da *Lennox* e calcular as atenuações sonoras em cada percurso percorrido pelo ruído desde o equipamento até ao difusor/extrator, tanto no processo de insuflação como no de extração,

respetivamente. Os valores dos níveis de potência sonora produzidos pela unidade *rooftop* à saída do ventilador são apresentados no quadro 6.27.

Quadro 6.27 - Nível de potência sonora (L_w) à saída do ventilador da unidade *rooftop* de bomba de calor *EO14 AH065*, da *Lennox*, em função da banda de oitava de frequência [56].

Banda de Frequência (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000
Nível de Potência Sonora (dBA)	74	71	70	66	62	54	46

A atenuação sonora devido à divisão de condutas é calculada a partir da fórmula (6.19), em que A_I representa a área da secção da conduta e A_T , a área da secção de todas as condutas que se distribuem a partir da conduta principal anterior [59].

$$\text{Atenuação} = 10 \log(A_I/A_T) \quad (\text{dB}) \quad (6.19)$$

A mudança de área da secção provoca atenuações sonoras que podem ser calculadas através da fórmula (6.20), em que A_1 representa a área da secção da conduta anterior e A_2 da conduta posterior [59].

$$\text{Atenuação} = 10 \log (0,25 * [(A_1/A_2)^{0,5} + (A_2/A_1)^{0,5}]^2) \quad (\text{dB}) \quad (6.20)$$

Por consulta do projeto de AVAC do cineteatro de Esmoriz verificou-se que as condutas principais presentes no auditório teriam uma secção retangular e seriam revestidas com aproximadamente 5 cm de fibra de vidro. Tendo em conta estas características e o comprimento de cada uma das condutas, calcularam-se as perdas sonoras recorrendo ao quadro 6.28, onde apenas são apresentados os valores da atenuação para as dimensões das condutas do sistema de ventilação do auditório [59].

Quadro 6.28 - Perdas sonoras por metro linear de condutas retangulares (em polegadas) revestidas com 5 cm de fibra de vidro [59].

Dimensões (in x in)	Perdas sonoras por frequências de 1/1 oitava (dB/metro linear de conduta)					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
10 x 8	1,97	7,21	13,44	19,67	18,03	11,15
14 x 10	1,64	5,25	11,48	16,40	13,44	9,18
18 x 12	1,31	4,59	10,49	15,08	11,48	8,20
17 x 16	1,31	3,93	9,51	13,44	9,51	7,21
20 x 19	1,31	3,93	9,51	13,44	9,51	7,21
25 x 23	0,98	2,95	8,20	11,48	7,21	5,90
23 x 33	0,98	2,62	7,54	10,49	6,23	5,25
23 x 47	0,66	2,30	7,21	9,84	5,57	4,92
31 x 29	0,66	2,62	7,21	10,16	5,90	5,25
35 x 33	0,66	2,30	6,56	9,51	5,25	4,59
39 x 33	0,66	2,30	6,56	9,51	5,25	4,59
31 x 47	0,66	2,30	6,56	9,51	5,25	4,59
49 x 34	0,66	1,97	6,23	8,52	4,59	4,26
59 x 31	0,66	1,97	6,23	8,85	4,59	4,26

Existem também algumas condutas circulares, também isoladas com 5 cm de fibra de vidro, pelo que é necessário contabilizar a atenuação sonora de cada uma, tendo em conta os valores do quadro 6.29, onde são apresentadas as perdas em dB por metro linear, apenas das condutas com os diâmetros utilizados no projeto de AVAC do auditório do cineteatro de Esmoriz [59].

Quadro 6.29 - Perdas sonoras por metro linear de condutas circulares (em polegadas) revestidas com 5 cm de fibra de vidro [59].

Diâmetro (in)	Perdas sonoras por frequências de 1/1 oitava (dB/metro linear de conduta)						
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
7	1,74	2,56	4,43	7,34	7,15	7,34	6,33
9	1,57	5,67	4,16	7,18	7,18	6,49	5,11
15	1,21	2,00	3,90	7,02	6,92	5,70	4,20

A atenuação sonora provocada por cotovelos e curvas nas condutas pode ser calculada recorrendo ao quadro 6.30 para secções retangulares e ao quadro 6.31 para secções circulares, em que fw resulta da multiplicação da frequência de 1/1 oitava em kHz pela largura da conduta [59].

Quadro 6.30 - Perdas sonoras provocadas por cotovelos e curvas retangulares nas condutas [59].

	Perdas inseridas pelos cotovelos/curvas (dB)
$fw < 1,9$	0
$1,9 \leq fw < 3,8$	1
$3,8 \leq fw < 7,5$	6
$7,5 \leq fw < 15$	11
$15 \leq fw < 30$	10
$fw > 30$	10

Quadro 6.31 - Perdas sonoras provocadas por cotovelos e curvas circulares nas condutas [59].

	Perdas inseridas pelos cotovelos/curvas (dB)
$fw < 1,9$	0
$1,9 \leq fw < 3,8$	1
$3,8 \leq fw < 7,5$	2
$fw > 7,5$	3

Por fim, os valores da atenuação sonora causada pelas reflexões finais na conduta, na zona dos difusores/extratores, podem ser obtidos recorrendo ao quadro 6.32.

Quadro 6.32 - Perdas sonoras provocadas pelas reflexões finais na conduta [59].

	Perdas inseridas pelas reflexões finais na conduta (dB)
$fw < 1,9$	0
$1,9 \leq fw < 3,8$	1
$3,8 \leq fw < 7,5$	2
$fw > 7,5$	3

Recorrendo aos quadros 6.28 a 6.32, onde são apresentados os valores das atenuações sonoras nas diferentes situações, e tendo em conta as dimensões das secções e comprimentos das condutas, foram calculadas as perdas totais em todos os percursos possíveis desde a unidade *rooftop* até aos difusores e

extratores. Sabendo o valor destas obtiveram-se os níveis de pressão sonora (L_p) que chegará a cada difusor e extrator, através da expressão (6.21), em que L_{Aw} corresponde ao valor do nível de potência sonora do equipamento.

$$L_p = L_{Aw} - \text{Perdas sonoras totais} \quad (\text{dBA}) \quad (6.21)$$

Fazendo a soma logarítmica dos L_p que chegarão a cada um dos catorze difusores, contabilizando já com as perdas sonoras referidas anteriormente, obtêm-se os valores totais dos níveis de pressão sonora, por banda de frequência de oitava, produzidos no processo de insuflação, apresentados no quadro 6.33.

Quadro 6.33 - Valores dos níveis de pressão sonora produzidos no processo de insuflação de ar para o auditório, por banda de frequência de 1/1 oitava.

Ruído de Insuflação		
Banda de Frequência (Hz)	L_p total (dBA)	L_p total (dB)
63	49,1	75,1
125	30,5	46,0
250	3,1	11,6
500	< 0	< 0
1000	< 0	< 0
2000	< 0	< 0
4000	< 0	< 0

Analisando o quadro 6.33, verificam-se níveis de pressão sonora elevados nas baixas frequências que precisam de ser diminuídos para não causar incomodidade dentro do auditório do cineteatro. Foi então dimensionado, através de um *software* desenvolvido pela empresa *Trox Technik*, um atenuador que fosse capaz de eliminar algum do ruído produzido no processo de insuflação, tendo em conta as dimensões da conduta onde este será colocado, os caudais de ventilação, a perda de pressão máxima e a velocidade máxima do ar, exigidos no projeto AVAC.

Os dados submetidos no *software* são os que estão apresentados na figura 6.43 e os valores das perdas sonoras causadas pela inserção de um atenuador, colocado na saída do ventilador de insuflação da unidade *rooftop*, são mostrados na figura 6.44.

Volume flow	20 000	m³/h	(0...504000)	
Air velocity Max.	12,01	m/s	(0,00...20,00)	
Flow noise Max.	50	dB(A)	(0...65)	
Pressure drop Max.	60	Pa	(≥0)	
Width (exact)	1 250	mm	(0, 140...4800)	☒ Fix
Height (exact)	870	mm	(150...3600)	☒ Fix
Length (max.)	3 000	mm	(500...3000)	☐ Fix

Figura 6.43 - Dados submetidos no *software* desenvolvido pela empresa *Trox Technik*, para o dimensionamento de um atenuador sonoro para o processo de insuflação [60].

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 k Hz	2 k Hz	4 k Hz	8 k Hz
Insertion Loss	10	14	33	> 50	> 50	> 50	> 50	46

Figura 6.44 - Perdas sonoras, em dB, introduzidas pelo atenuador acústico colocado à saída do ventilador de insuflação da unidade *rooftop* [60].

O modelo de atenuador acústico capaz de introduzir estas perdas sonoras nas diferentes bandas de 1/1 de oitava de frequência, é o *XSA100-79-7-PF* (Figura 6.45) e leva a valores dos níveis de pressão sonora do mecanismo de insuflação apresentados no quadro 6.34.

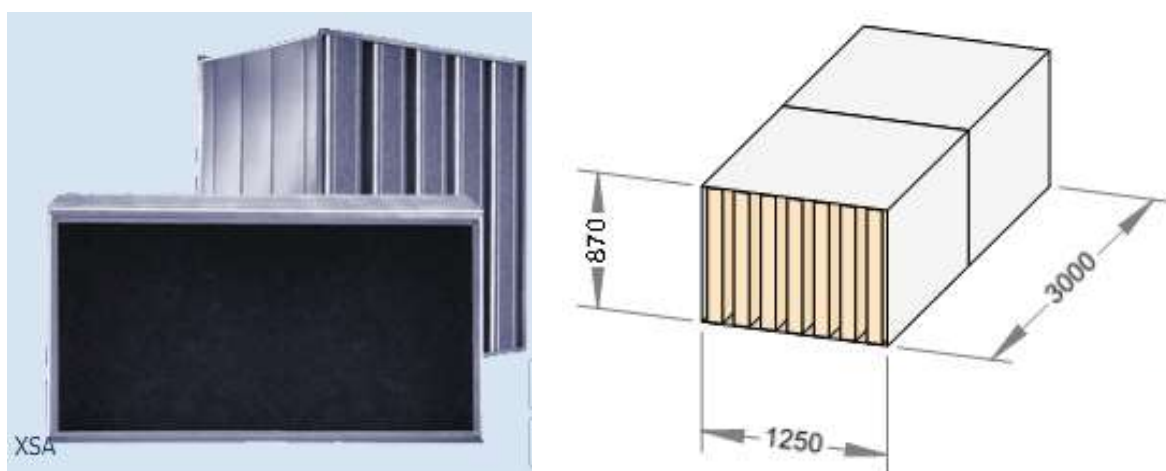


Figura 6.45 – Imagem (à esquerda) e esquema representativo (à direita) do atenuador *XSA100-79-7-PF* dimensionado para diminuir os níveis de pressão sonora provocados pelo processo de insuflação de ar para o auditório [60].

Quadro 6.34 - Níveis de pressão sonora do ruído provocado pela insuflação de ar no auditório após a colocação do atenuador sonoro *XSA100-79-7-PF* à saída da unidade *rooftop*.

Ruído de Insuflação			
Banda de Frequência (Hz)	Lp (insuflação) (dB)	Perdas (Atenuador) (dB)	Lp _{final} (insuflação) (dB)
63	75,1	10,0	65,1
125	46,0	14,0	32,0
250	11,6	33,0	< 0
500	< 0	> 50	< 0
1000	< 0	> 50	< 0
2000	< 0	> 50	< 0
4000	< 0	> 50	< 0

Para fazer a avaliação do ruído provocado pela extração de ar do auditório, recorreu-se à expressão (6.21), somando, posteriormente, de forma logarítmica, os níveis de pressão sonora que chegam a cada um dos 18 orifícios de extração, obtendo-se assim os valores apresentados no quadro 6.35.

Quadro 6.35 - Valores dos níveis de pressão sonora produzidos no processo de extração de ar do auditório, por banda de frequência de oitava.

Ruído de extração		
Banda de Frequência (Hz)	Lp total (dBA)	Lp total(dB)
63	43,8	69,8
125	12,3	27,8
250	< 0	< 0
500	< 0	< 0
1000	< 0	< 0
2000	< 0	< 0
4000	< 0	< 0

Tal como no mecanismo de insuflação de ar, verificam-se níveis de pressão sonora elevados nas baixas frequências, pelo que, através do *software* da *Trox Technik*, decidiu-se dimensionar um atenuador a colocar à saída do ventilador de extração da unidade *rooftop*, tendo em conta as dimensões da conduta onde este será colocado, o caudal, a perda máxima de pressão e da velocidade máxima do ar, exigidos no projeto AVAC.

Os dados submetidos no *software* são apresentados na figura 6.46 e as perdas sonoras introduzidas pela colocação de um atenuador à saída do ventilador de extração da unidade *rooftop*, são mostradas na figura 6.47.

Volume flow	18 015	m³/h	(0...504000)
Air velocity Max.	11,12	m/s	(0,00...20,00)
Flow noise Max.	50	dB(A)	(0...65)
Pressure drop Max.	60	Pa	(≥0)
Width (exact)	1 500	mm	(0, 140...4800) ☒ Fix
Height (exact)	800	mm	(150...3600) ☒ Fix
Length (max.)	3 000	mm	(500...3000) ☐ Fix

Figura 6.46 - Dados submetidos no *software* desenvolvido pela empresa *Trox Technik*, para o dimensionamento de um atenuador sonoro para o processo de extração de ar [60].

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 k Hz	2 k Hz	4 k Hz	8 k Hz
Insertion Loss	10	15	34	> 50	> 50	> 50	> 50	48

Figura 6.47 - Perdas sonoras, em dB, introduzidas pelo atenuador acústico colocado à saída do ventilador de extração da unidade *rooftop* [60].

O modelo de atenuador acústico capaz de introduzir estas perdas sonoras nas diferentes bandas de 1/1 de oitava de frequência, é o *XSA100-67-9-PF* (Figura 6.48) e leva a valores dos níveis de pressão sonora do mecanismo de extração apresentados no quadro 6.36.

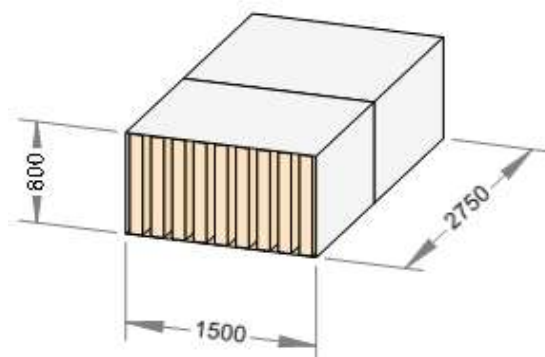


Figura 6.48 - Esquema representativo do atenuador XSA100-67-9-PF dimensionado para diminuir os níveis de pressão sonora provocados pelo processo de extração de ar do auditório [60].

Quadro 6.36 - Níveis de pressão sonora do ruído provocado pela extração de ar do auditório após a colocação do atenuador sonoro XSA100-67-9-PF à saída da unidade rooftop.

Ruído de Extração			
Banda de Frequência (Hz)	Lp (extração) (dB)	Perdas (Atenuador) (dB)	Lp _{final} (extração) (dB)
63	69,8	10,0	59,8
125	27,8	15,0	12,8
250	< 0	34,0	< 0
500	< 0	>50	< 0
1000	< 0	>50	< 0
2000	< 0	>50	< 0
4000	< 0	>50	< 0

Com o objetivo de perceber quais os níveis de pressão sonora provocados pelos processos de insuflação e extração de ar, simultaneamente, somaram-se logaritmicamente os valores dos dois mecanismos, obtendo-se os resultados do quadro 6.37.

Quadro 6.37 - Níveis de pressão sonora totais tendo em conta a simultaneidade de funcionamento do processo de insuflação e extração de ar, contabilizando as perdas originadas pela presença dos atenuadores sonoros.

Ruído de ventilação do auditório			
Banda de Frequência (Hz)	Lp (insuflação) (dB)	Lp (extração) (dB)	Lp (total) (dB)
63	65,1	59,8	66,2
125	32,0	12,8	32,1

Para avaliar o desconforto acústico que o funcionamento da ventilação do auditório possa causar no público que assiste ao espetáculo, recorreu-se às curvas de incomodidade *NC*. Na figura 6.49 são colocados, a pontos vermelhos, os níveis de pressão sonora em cada banda de oitava de frequência. Tendo em conta que para uma situação de excelente acústica de auditórios, o maior valor de L_p do ruído produzido deve estar abaixo da curva *NC-20*, pode concluir-se que, mesmo com a utilização de atenuadores sonoros, a ventilação pode causar problemas acústicos na sala, na banda de oitava de frequência de 63 Hz. Tendo em conta que os atenuadores foram dimensionados para uma perda de pressão máxima de 60 Pa (valor limite verificado na consulta do projeto de AVAC), teria de ser estudada, juntamente com o engenheiro mecânico, uma solução de ventilação diferente que proporcionasse um melhor conforto acústico dentro do auditório.

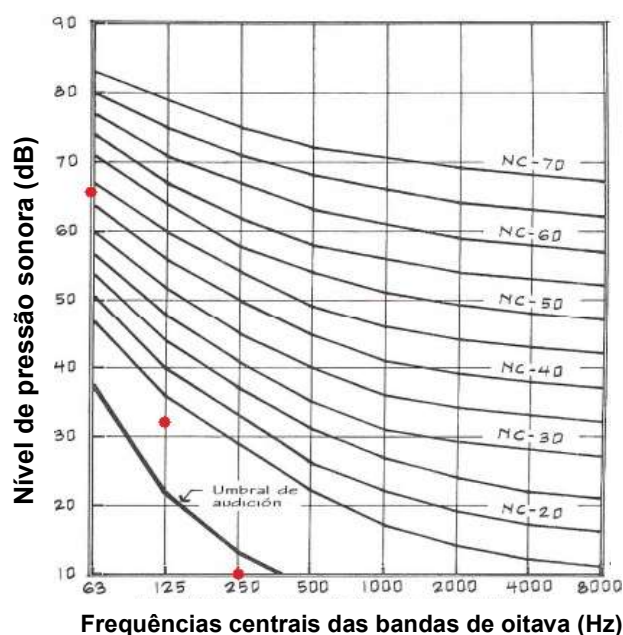


Figura 6.49 - Avaliação da incomodidade causada pelos ruídos de ventilação no auditório recorrendo a curvas *NC*.

No cumprimento da legislação referente ao *Reglamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE)*, o ruído provocado pelo AVAC deve ter um valor de L_{Aeq} inferior a 38 dB, associado a uma incerteza de 3 dB. Tendo como maior preocupação o nível de pressão sonora produzido na banda de oitava de frequência de 63 Hz com um L_p igual a 66,2 dB (40,2 dBA) que, neste caso será igual a L_{Aeq} .

O nível de pressão sonora produzido pelo funcionamento dos equipamentos de AVAC (L_{Aeq}) é superior aos 38 dBA, máximo exigido pelo RRAE, mas associando a incerteza de 3 dB, o valor de 40,2 dBA já fica dentro dos limites legais do ruído permitido para sistemas de ventilação dentro de recintos de espetáculos.

6.2.2.2. Ruídos dos *foyers* envolventes ao auditório

Tendo em conta o ruído que possa ser produzido nos *foyers* e na cafeteria aí existente, é necessário pensar numa solução de isolamento sonoro eficaz para as paredes que separam estes do espaço do auditório.

Foi pensada a solução de criar uma parede leve em gesso cartonado de 1,5 cm, associada a uma caixa de ar de 15 cm a partir da parede de alvenaria existente de tijolo rebocada de 30 cm (Figura 6.50).

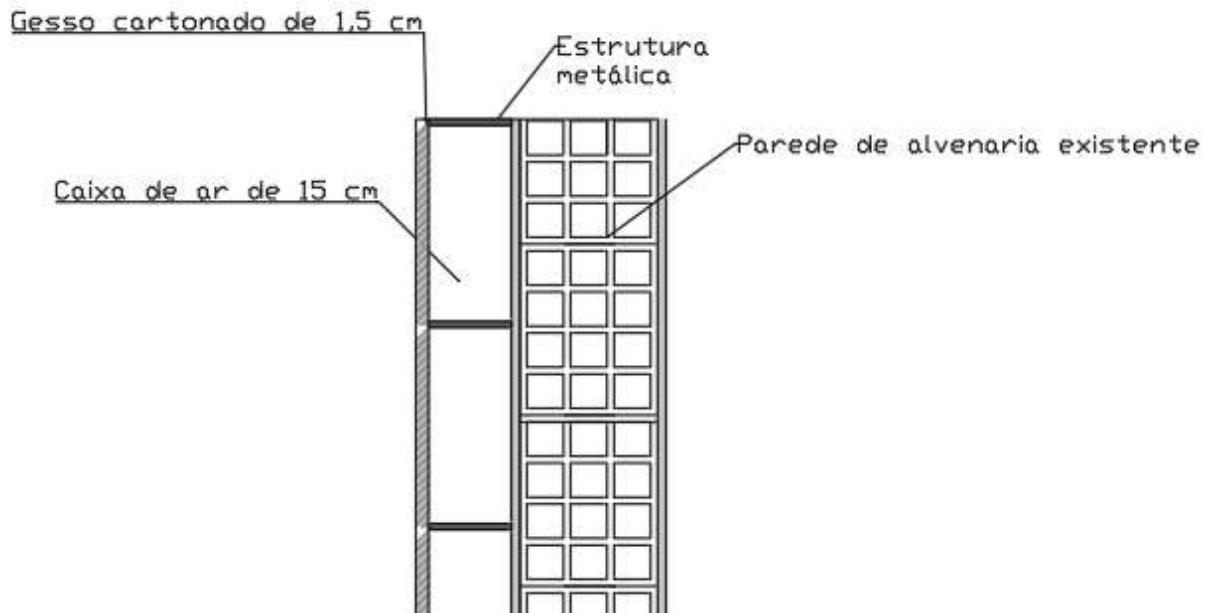


Figura 6.50 - Corte vertical do elemento construtivo pensado para as paredes de separação entre os foyers e o auditório.

Foi utilizado o *método de Meisser* para a obtenção aproximada dos valores da redução sonora (R) em função da frequência para paredes duplas.

Primeiramente determinou-se o R para a frequência de 500 Hz, com base na expressão (6.22), tendo em conta o valor da massa da parede de alvenaria de 390 kg/m^2 e $22,8 \text{ kg/m}^2$ da parede de gesso cartonado. O valor de K é igual a 9 dB pois temos uma espessura da caixa de ar superior a 10 cm. Portanto, seguindo a expressão (6.22) obtém-se um $R_{500 \text{ Hz}}$ de 57,2 dB.

$$R_{500 \text{ Hz}} = 13,3 \log(m_{\text{alvenaria}} + m_{\text{gesso cartonado}}) + K + 13,4 \quad (\text{dB}) \quad (6.22)$$

A frequência de ressonância do sistema massa-ar-massa (f_o) pode ser calculada a partir da expressão (6.23), tendo em conta as massas de cada um dos elementos construtivos e a espessura (d) da caixa de ar de 15 cm, obtendo-se um valor de f_o de 46,7 Hz

$$f_o = 84 \sqrt{\frac{m_{\text{alvenaria}} + m_{\text{gesso cartonado}}}{d * m_{\text{alvenaria}} * m_{\text{gesso cartonado}}}} \quad (\text{Hz}) \quad (6.23)$$

As frequências críticas da parede de alvenaria e do gesso cartonada são de 140 e 1100 Hz, respetivamente. A frequência associada a uma possível ressonância inicial da cavidade da caixa de ar (fn_1) é de 1133 Hz e é calculada a partir da expressão (6.24) em que d representa a espessura da cavidade (15 cm).

$$fn_1 = \frac{170}{d} \quad (\text{Hz}) \quad (6.24)$$

Sabendo os valores das frequências de ressonância do sistema e da cavidade da caixa de ar, das frequências críticas de cada elemento construtivo e a redução sonora na frequência central de oitava de 500 Hz, traçam-se as retas de crescimento de +6, +8, +10 e -10 dB, segundo as regras do *método de Meisser*, obtendo-se o gráfico do comportamento teórico do elemento construtivo em questão (Figura 6.51) e os valores da redução sonora por banda de frequência de oitava do quadro 6.38.



Figura 6.51 - Comportamento teórico do elemento construtivo constituído por uma parede de alvenaria de 30 cm, uma caixa de ar de 15 cm e uma parede de gesso cartonado de 1,5cm, em função das bandas de frequência de oitava.

Quadro 6.38 - Valores da redução sonora (R) da solução construtiva adotada para as paredes de separação entre os *foyers* e o auditório, utilizando o *método teórico de Meisser*.

F (Hz)	$f_0=46,7$	63	125	$f_{c1}=140$	250	500	1000	$f_{c2}=1100$	2000	4000	8000
R (dB)	35	39	43	43	52	58	59	58	66	73	81

Para a determinação da redução sonora média (R_w) da solução construtiva, referida anteriormente, recorreu-se ao procedimento de ajuste da curva real dos valores de R , obtendo-se o valor de R_w igual a 61 dB e tendo em conta a existência das transmissões marginais, pelo método simplificado subtraíram-se 2 dB, ficando-se com um valor final de R'_w igual a 59 dB.

Com o objetivo de perceber qual o valor do índice de isolamento sonoro normalizado (DnT) do proposto elemento construtivo recorreu-se à expressão (6.25), tendo em conta um volume do auditório (V) de 8574 m³, e uma área de superfície do elemento de separação (S) de aproximadamente 96 m² no foyer nascente, 88 m² no foyer central e 124 m² no foyer poente, obtendo-se valores de DnT de 70,6 dB, 70,9 dB e 69,4 dB, respetivamente.

$$DnT = R'_w + 10 \log \left(\frac{0,16 \cdot V}{S \cdot 0,5} \right) \quad (dB) \quad (6.25)$$

Perante os resultados obtidos pode concluir-se que o sistema construtivo pensado irá satisfazer as necessidades de isolamento sonoro necessário, tendo em consideração o ruído elevado que possa ser produzido nos foyers envolventes ao auditório e na cafeteria, de forma a não causar perturbações no público que assiste ao espetáculo.

Para aumentar a eficácia do isolamento sonoro destas paredes de separação decidiu-se colocar uma camada de lã de vidro com 4 cm na caixa de ar, o que perfaz uma taxa de ocupação de 27% da cavidade, sendo que próximo deste valor se atinge a eficácia máxima da colocação de absorvedor sonoro. A colocação deste material na caixa de ar irá diminuir a frequência de ressonância até 30%, permitindo que o crescimento da curva da redução sonora comece a surgir o mais cedo possível para que se consiga um valor de R mais elevado em todas as bandas de oitava de frequência e irá, também, reduzir a perturbação causada pelas ressonâncias de cavidade em 2 a 4 dB [1].

A eficácia da colocação de absorvedor sonoro só é conseguida se se utilizarem sistemas não rígidos para unir os dois paramentos (parede de alvenaria e de gesso cartonado) para evitar ruídos por vibrações, pelo que se decidiu utilizar o dispositivo da figura 6.52, da marca *Rondo* para se conseguir evitar uma ligação sólida dos elementos. É importante referir que este sistema será também utilizado nas paredes interiores do auditório na fixação da estrutura metálica, que suporta o contraplacado e o gesso cartonado, à parede de alvenaria de forma a eliminar possíveis ruídos de vibrações que possam ser produzidos.



Figura 6.52 - Dispositivo resiliente da marca *Rondo* usado para unir os dois paramentos do elemento construtivo composto por uma parede de alvenaria e por uma parede de gesso cartonado. [61]

Foi ainda pensada a criação de um pavimento resiliente na zona envolvente ao auditório com o intuito de diminuir os ruídos de impacto (passos) que possam causar incomodidade dentro do auditório. Para tal escolheu-se utilizar um aglomerado de cortiça de 10/5 mm, modelo *U85*, desenvolvido pela empresa *Amorim, Cork Composites* (Figura 6.53). O pavimento ficará composto pelo material resiliente sobre a superfície de betão, seguido de uma barreira para-vapor e de uma laje flutuante em betão leve onde irá assentar o revestimento vinílico previsto em projeto. Deve ter-se sempre em atenção dobrar a camada resiliente nos cantos originados pela interseção da laje do pavimento com a parede. Esta solução oferece uma eficácia de redução sonora de ruídos provocados por impacto de cerca de 27 dB.



Figura 6.53 - Aglomerado de cortiça a ser utilizado como material resiliente no pavimento da zona envolvente do auditório [62].

6.2.2.3. Ruídos das instalações sanitárias e camarins na zona do palco

Outro dos focos do ruído que pode interferir no bom funcionamento do auditório são as instalações sanitárias e os camarins existentes nas laterais do palco. Estes espaços estão atualmente separados por uma parede de alvenaria de 30 cm.

Foi decidido realizar uma parede leve de gesso cartonado de 3 cm associado a uma caixa de ar de 15 cm, tal como nos *foyers* envolventes do cineteatro.

Será fundamental ter em atenção as tubagens hidráulicas das instalações sanitárias que deverão ser passadas por dentro da caixa de ar e nunca no interior das paredes que fazem a separação entre este espaço e o auditório. De forma a fixar essas tubagens à parede de alvenaria, sem que existam problemas de vibrações, decidiu-se utilizar umas abraçadeiras resilientes, como é exemplo a da figura 6.54 da *Saint-Gobain*.



Figura 6.54 - Abraçadeiras resilientes para fixação de tubagens hidráulicas de modo a eliminar ruídos por vibração [63].

O pavimento também terá uma camada resiliente, através da utilização do aglomerado de cortiça *U85*, da *Amorim, Cork Composites*, tal como na zona dos *foyers* com a diferença que, neste caso, o revestimento será cerâmico.

Tal como foi referido no subcapítulo da correção acústica, foi decidida a colocação de portas do tipo *Silentium PM 43R*, com um índice de redução sonora (R_w) de 46 dB, nas paredes laterais que dão acesso aos camarins e às instalações sanitárias, pelo que será um elemento importante para um isolamento sonoro eficaz entre estes espaços e o palco da sala de espetáculos.

7

CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÃO

A presente dissertação teve como principal objetivo a realização de um projeto de acústica variável para o auditório do cineteatro de Esmoriz, incorporado no edifício *Esmoriztur*. Existindo atualmente este espaço em fase de profunda reabilitação, foi necessário estudá-lo, antes da eminente alteração, e aceder a plantas e alçados deste para se perceber as dimensões e disposição da sala e ter uma primeira impressão do local.

Foi decidido que a par de um projeto de correção acústica do interior do auditório era também fundamental estudar um adequado isolamento sonoro deste a possíveis ruídos dos espaços envolventes à sala e do sistema de ventilação. Só desta forma se conseguia conceber um espaço acusticamente confortável para o público que aí fosse assistir aos espetáculos

O grande desafio deste projeto foi conceber uma sala que fosse acusticamente variável e que conseguisse responder da melhor forma a todas as utilizações futuras que o auditório pudesse ter, tendo como principal propósito a criação de uma acústica mais favorável para espetáculos de música *Pop/Rock*, *Teatro*, *Cinema* e conferências, nunca descartando a hipótese de que este espaço pudesse receber também eventos de música de *Câmara* e *Sinfónica*.

Sendo este um projeto de acústica variável, foi imprescindível a realização de medições do tempo de reverberação (*TR*) da sala no seu estado primário, com o espaço completamente vazio (à exceção da já existência das condutas de ventilação). Com um volume aproximado de 8574 m³, a sala apresentou os valores de *TR* por banda de frequência de 1/1 oitava, mostrados no quadro 7.1.

Quadro 7.1 – Valores do Tempo de Reverberação do auditório do cineteatro de Esmoriz, por banda de 1/1 oitava de frequência, medidos na situação inicial (sem cadeiras e sem pessoas).

Banda de Frequência (Hz)	TR (s)
125	2,00
250	1,62
500	1,60
1000	1,77
2000	1,90
4000	1,65

Tendo como objetivo conceber um projeto de acústica que beneficiasse principalmente espetáculos de música *Pop/Rock* e atividades em que se privilegiasse a palavra era essencial baixar significativamente os valores do tempo de reverberação em todas as bandas de oitava de frequência.

Antes de se pensar numa forma de tornar o espaço acusticamente variável, foi necessário dimensionar superfícies de reflexão que proporcionassem a chegada de ondas sonoras benígnas, através do som direto e de ondas sonoras refletidas, a todas os lugares da plateia. Foram então projetados um teto e superfícies laterais refletoras, procurando sempre assegurar que as ondas sonoras refletidas não chegassem ao público demasiado tarde em relação ao som direto. Foi também essencial tratar acusticamente as paredes traseiras com materiais absorventes e difusores, para que a chegada de reflexões tardias não interferissem na *performance* dos executantes, no palco.

Depois do dimensionamento das superfícies refletoras, só se podia avançar para o projeto de acústica variável depois de se saber qual o efeito que essas superfícies, o pavimento, as cadeiras da plateia e outros materiais indispensáveis ao bom funcionamento do auditório, pudessem ter no tempo de reverberação da sala.

Com a contabilização do efeito dos materiais, referidos anteriormente, conseguiu-se baixar drasticamente o tempo de reverberação das médias e altas frequências, mas era ainda necessário introduzir algum material no auditório que fizesse baixar o *TR* das baixas frequências. Com a colocação de contraplacado de 3 mm associado a uma caixa de ar de 150 mm preenchida com 75 mm em parte da área das paredes da sala, foi conseguido reduzir significativamente esse valor, chegando-se aos valores do *TR* do quadro 7.2.

Quadro 7.2 – Valores previsíveis do tempo de reverberação do auditório do cineteatro de Esmoriz, por banda de 1/1 oitava de frequência, obtidos após se contabilizarem os efeitos dos materiais indispensáveis ao funcionamento da sala e à colocação de contraplacado de 3 mm.

Banda de Frequência (Hz)	TR (s)
125	1,31
250	1,09
500	1,03
1000	1,05
2000	1,09
4000	1,01

Perante os valores de *TR* do quadro 7.2, fez-se uma análise do que seria necessário mudar para se conseguir aproximar estes valores dos ideais de cada atividade.

Para espetáculos de música *Pop/Rock* era necessário diminuir o *TR* das médias e altas frequências para um valor inferior a 1 segundo e diminuir o das baixas frequências de forma a ter uma majoração de cerca de x1,25 em relação às outras frequências.

Em relação a atividades que privilegiavam a palavra, tinha de se diminuir o *TR* para valores inferiores a 1 segundo em todas as frequências, de forma a ter-se uma quase equidade em todas as bandas de 1/1 oitava de interesse.

Para concertos de música de *Câmara* e *Sinfónica*, tinha de se tentar manter os valores de *TR* do quadro 7.2, tendo a noção que estes não eram os valores ideais para este tipo de eventos.

Para se obter uma adaptação eficaz da reverberação da sala a cada tipo de utilização, foram pensados três sistemas que oferecessem a variabilidade necessária dos TR . Tendo em conta que era nas baixas frequências que se procurava uma maior variação do tempo de reverberação, desenvolveram-se dois sistemas em que, por um lado, houvessem superfícies de contraplacado para absorver as ondas sonoras, e por outro, existissem superfícies de madeira maciça envernizada altamente refletoras. Para as médias e altas frequências decidiu-se dispor várias cortinas nas paredes do auditório para que estas, estando abertas, absorvessem as ondas sonoras e, estando fechadas, o som fosse refletido nas paredes de alvenaria existentes.

Com o projeto de acústica variável desenvolvido, obtiveram-se os valores de TR do quadro 7.3, para cada tipo de utilização do auditório.

Quadro 7.3 – Valores do Tempo de Reverberação previsíveis através do projeto de acústica variável para os diferentes tipos de utilização do auditório.

Tempos de reverberação previsíveis na sala para cada atividade (s)			
Frequência (Hz)	Música Pop/Rock	Teatro, Cinema e conferências	Música de Câmara e Sinfónica
125	1,3	1,1	1,4
250	1,0	1,0	1,1
500	1,0	0,9	1,1
1000	1,0	1,0	1,1
2000	1,1	1,0	1,2
4000	1,0	1,0	1,1

Fazendo uma análise dos resultados obtidos, pode concluir-se que se conseguiram atingir os objetivos propostos para o projeto de acústica variável do auditório do cineteatro de Esmoriz, capaz de responder eficazmente aos diferentes tipos de eventos que este espaço possa acolher.

Nas atividades relacionadas com a Palavra conseguiram-se valores de TR abaixo ou próximos de 1 segundo em todas as bandas de frequência de oitava, à exceção da de 125 Hz, que mesmo assim ficou muito próximo desse valor. Alcançou-se um $TR_{\text{médio}}$ de 1 segundo, sendo este um valor bastante razoável para este tipo de eventos.

Para espetáculos de música *Pop/Rock*, obtiveram-se valores de TR abaixo ou próximos de 1 segundo nas médias e altas frequências com uma majoração de cerca de x1,25 na baixa frequência de 125 Hz, tal como pretendido. Conseguiu-se um $TR_{\text{médio}}$ de 1 segundo, o que representa um valor muito satisfatório dentro daquilo que é o ideal para este tipo de atividades.

Por fim, para concertos de música de Câmara e Sinfónica conseguiram-se valores de TR acima de 1 segundo em todas as médias e altas frequências, com uma majoração de x1,25 na frequência de oitava de 125 Hz. Obteve-se um $TR_{\text{médio}}$ de 1,1 segundos, o que representa um valor abaixo do ideal, mas após a colocação das cadeiras e carpete na plateia, exigidos pelo Dono de Obra, não houve forma adequada de conseguir valores de TR mais elevados. Contudo, visto esta ser uma atividade com pouca relevância no futuro cartaz cultural do cineteatro aceita-se que se dê uma menor importância em detrimento dos eventos que decorrerão maioritariamente no cineteatro de Esmoriz.

Em relação ao isolamento sonoro, existiam três pontos problemáticos de ruído que precisaram de ser tratados e eliminados. O ruído produzido pelo sistema AVAC, o ruído produzido nos *foyers* envolventes ao auditório e o ruído proveniente dos camarins e instalações sanitárias na zona do palco.

Para se conseguir eliminar os ruídos aéreos produzidos pelos equipamentos de AVAC (uma unidade *rooftop* de bomba de calor e duas unidades de tratamento de ar), dispostos na cobertura, decidiu-se colocar barreiras acústicas com um índice de redução sonora de 35 dB que aliadas à existência das paredes de alvenaria do auditório com um R_w de 54 dB, se conseguiu obter o efeito de isolamento sonoro desejado.

Outro dos problemas provenientes do funcionamento do sistema de ventilação teve que ver com o ruído que chegava ao auditório através das condutas de ventilação, provenientes da unidade *rooftop*. Devido ao elevado nível de pressão sonora do ruído produzido, foi decidido dimensionar dois atenuadores acústicos, um para o processo de insuflação e outro para o de extração. Calculou-se o efeito destes dispositivos na diminuição do L_p resultantes do funcionamento dos equipamentos, obtendo-se os valores apresentados no quadro 7.4, pelo que, tendo como referência as curvas de incomodidade NC , se verificaram valores elevados na banda de oitava de 63 Hz, razoáveis nos 125 Hz e nulos nas frequências superiores.

Quadro 7.4 - Níveis de pressão sonora do ruído produzido pelo sistema de ventilação no auditório do cineteatro de Esmoriz.

Ruído de ventilação do auditório	
Banda de Frequência (Hz)	L_p (total) (dB)
63	66,2
125	32,1

Foi ainda necessário eliminar ruídos de vibrações que os equipamentos de AVAC poderiam causar na laje de cobertura onde estavam dispostos. Dimensionaram-se, então, lajes de inércia com a utilização de dispositivos resilientes de borracha sob estes, para a unidade *rooftop* e para as duas unidades de tratamento de ar. Outros ruídos também foram minimizados/eliminados com a utilização de mangas resilientes em zonas de atravessamento das condutas pelos elementos construtivos e de borrachas resilientes a servirem de apoio das condutas na estrutura metálica do teto do auditório.

A criação de paredes leves de gesso cartonado de 15 mm associadas a uma caixa de ar de 150 mm preenchidas parcialmente com 40 mm de lã mineral, permitiram aumentar o índice de isolamento sonoro das paredes de alvenaria que separam o auditório dos *foyers*, para um valor de até 71 dB, o que representa um muito eficaz isolamento sonoro da sala em relação aos ruídos das atividades que possam ser praticadas nos espaços envolventes, incluindo na cafeteria.

Com vista a eliminar os ruídos dos camarins e das instalações sanitárias que podiam entrar no auditório, nomeadamente na zona do palco, decidiu-se, criar o mesmo tipo de paredes referidas anteriormente para os *foyers*, o que se traduz num elevado índice de isolamento sonoro. Foram também escolhidas portas para o acesso aos camarins pela traseira do palco, muito isolantes com um índice de redução sonora de 46 dB.

Convém referir que a estrutura metálica que irá servir de suporte às placas de gesso cartonado, será fixada à parede de alvenaria através de dispositivos resilientes capazes de eliminar possíveis vibrações que possam ser originadas.

Na tentativa de anular as vibrações que as tubagens hidráulicas pudessem gerar nas instalações sanitárias, decidiu-se fazê-las passar na cavidade da caixa de ar, separadas das paredes de alvenaria, mas fixadas a estas através de umas abraçadeiras anti-vibráteis.

Acredita-se, portanto, que o projeto de acústica variável concebido para o auditório do cineteatro de Esmoriz e o cuidado que se teve em tentar anular os ruídos que podiam interferir na comodidade do público, tornariam esta sala num bom ponto de encontro para a realização de inúmeras atividades culturais, com uma resposta eficaz a qualquer que fosse a utilização do espaço.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Após a conclusão desta dissertação, que passou pela realização de um projeto de acústica variável e de isolamento sonoro de um auditório, é aconselhado o desenvolvimento dos seguintes tópicos:

- Estudo de uma forma eficaz de eliminação de ruídos provocados pelo sistema AVAC num espaço de grande exigência acústica, como é o caso de auditórios e salas de concerto;
- Utilização de um *software* de acústica de auditórios para simulação da resposta do espaço à introdução de diferentes materiais;
- Realização de um estudo sobre a opinião do público em resposta a diferentes parâmetros acústicos subjetivos de salas com projetos de acústica variável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, A.P.O. - *Acústica Ambiental e de Edifícios*, FEUP. 2019.
- [2] Barron, M. - *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. Spoon Press, Londres. 2010.
- [3] https://www.researchgate.net/figure/Frequency-ranges-of-several-musical-instruments-30_fig3_228446442. acedido em 02/2020.
- [4] <https://conhecimentocientifico.r7.com/ondas-sonoras/>. acedido em 02/2020.
- [5] <https://www.emaze.com/@AOLWLOOTC/FEN%C3%93MENOS-AC%C3%9ASTICOS---rEFRA%C3%87%C3%83O>. acedido em 02/2020.
- [6] http://sinop.unemat.br/site_antigo/prof/foto_p_downloads/fot_12513aula_7_abs_i_pdf_Aula_7_Abs_I.pdf. acedido em 03/2020.
- [7] Cremer, L. & Müller, H. - *Principles and applications of room acoustic*. Applied Science, Londres. 1982.
- [8] Schultz T. & Waters, B.G. - *Propagation of sound across audience seating*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 885-896. 1964.
- [9] Morimoto, M. & Maekawa, Z. - *Auditory spaciousness and envelopment*. *Proceedings of the 13th International Congress on Acoustics*, Belgrado. 1989.
- [10] Blauert, J. - *Spatial hearing*. MIT Press, Cambridge. 1983.
- [11] Barron, M. - *Interpretation of early decay times in concert auditoria*. *Acustica*. 1995.
- [12] Barron, M. - *Early decay times in the Christchurch and Wellington concert Halls, Nova Zelândia*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2229-2231. 1998.
- [13] <https://docplayer.com.br/47061347-Caracterizacao-acustica-de-grandes-auditorios.html>. acedido em 03/2020.
- [14] Schroeder, M. - *Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: more lateral diffusion*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 958-963. 1979.
- [15] <https://www.acousticfields.com/product/sounddiffuser-acousticdiffuser-qd23/>. acedido em 03/2020.
- [16] <http://www.acousticsfirst.com/diffuser-art-diffusor-model-w.htm>. acedido em 04/2020.
- [17] Sabine, W. - *Architectural Acoustics*. American Architect. 1900.
- [18] Atal, B., Schroeder, M. & Sessler, G.- *Subjective reverberation time and its relation to sound decay*. *Proceedings of the 5th International Congress on Acoustics*, Liege, Paper G32. 1965.
- [19] Reichardt, W. - *Definition und Messgrundlage eines objektiven Masses zur Ermittlung der Grenze zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit bei Musikdarbietung*. *Acustica*. 1975.
- [20] Thiele, R. - *Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen*. *Acustica*, 291-302. 1953.
- [21] Cremer, L. & Müller, A.H. - *Principles and Applications of Room Acoustics*. Vol.1, Applied Science, Londres. 1978.
- [22] Gade, A. - *Investigations on musicians' room acoustic conditions in concert halls: Field experiments and synthesis of results*. *Acustica*, 249-262. 1989.
- [23] Barron, M. & A.H. Marshall. - *Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: the derivation of a physical measure*. *Journal of Sound and Vibration*, 211-232. 1981.
- [24] Marshall, L. - *A note on the importance of room cross-section in concert halls*. *Journal of Sound and Vibration*, 100-112. 1967.
- [25] Barron, M. - *The subjective effects of first reflections in concert halls - the need for lateral reflections*. *Journal of Sound and Vibration*, 475-494. 1971.
- [26] Danckwardt, V. P. - *O edifício teatral. Resultado edificado da relação palco-platéia*. U. Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2001.
- [27] Long, M. - *Architectural Acoustics*. Elsevier Academic Press. 2006.
- [28] ViajarAtenas, <https://www.viajaratenas.com/teatro-de-dioniso/>. acedido em 03/2020.
- [29] Pollio, M. V. - *The ten books on architecture*. Harvard University Press, Londres. 1914.
- [30] Silva de Marco, C. - *Análise acústica de auditórios musicais depois de construídos*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, U. de Brasília. 2009.
- [31] Izenour, G. - *Theater Design*. Archive at Penn State University, New York, McGraw-Hill. 1977.
- [32] <https://online.sapo.pt/artigo/360685/encerrado-tr-nsito-perto-do-coliseu-de-roma-por-cao-da-poluicao-?seccao=Mundo>. Jornal i. acedido em 03/2020.

- [33] <http://ciateatralosmarias.blogspot.com/2013/09/teatro-renascentista.html>. acedido em 03/2020.
- [34] Forsyth, M. - *Buildings for Music*. Cambridge, MA: MIT Press. 1985.
- [35] Garnier, C. - *Le nouveau Opéra de Paris*, Ducher et Cie, Paris. 1880.
- [36] Sabine, W. - *Collected Papers on Acoustics*, Dover Publications. Nova Iorque 1922.
- [37] <http://www.audium.com.br/videos/>. acedido em 03/2020.
- [38] Langhans, C. F. - *Über Theater oder Bemerkungen über Katakustik*, Gottfried Haydn, Berlim.. 1810.
- [39] Watson, F.R. - *Acoustics of building including acoustics of auditoriums and soundproofing of rooms*, John Wiley & Sons, Londres. 1948.
- [40] Mehta, M. , Johnson, J. e Rocafort, J. - *Architectural Acoustics: principles and design*, Courier Kendallville Inc., Nova Jersey. 1999.
- [41] Portal Acústica, <https://www.youtube.com/watch?v=Eh6S44fYznQ>. acedido em 03/2020.
- [42] Silva, P. M. - *Acústica de auditórios para música*, Lisboa. 1975.
- [43] Cavanaugh, W. J. & Wilkes, J. - *Architectural Acoustics: Principles and Practice*. 2ª ed., J.W. & Sons, Inc. 1999.
- [44] *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE)*, DL 95/2019 de 18/07/2019.
- [45] Diário de entre Douro e Vouga, <https://online.pt/2018/02/04/15-milhoes-ressuscitam-cineteatro-esmoriztur-com-525-lugares-sentados/>. acedido em 03/2020.
- [46] LogAcustica, <https://logacustica.com/coeficientes-de-absorcao-sonora-sound-absorption-coefficients/>. acedido em 03/2020.
- [47] Euroseating, <https://www.euroseating.com/pt-pt/cadeiras/auditorios/nus/#img>. 03/2020.
- [48] Silêncio, <https://www.silencio.pt/wp-content/uploads/2018/04/FT-SILENTIUM-BT60bruto.pdf>. acedido em 04/2020.
- [49] Ideatec, <https://www.ideatec.es/panel-difusor-acustico-d-wood/>. 04/2020.
- [50] Afrel, <https://www.afrel.com.br/essex-serie-3200-em-manta-6mm-x-3-66-m2-ref-490-roraima.html#>. acedido em 04/2020.
- [51] Akustik, <http://www.akustik.ua/>. acedido em 04/2020.
- [52] Stier, <http://stier-acustica.com/Ficheiros.ashx?i=11910>. acedido em 04/2020.
- [53] Silêncio, <https://www.silencio.pt/wp-content/uploads/2018/04/12-PM35R.pdf>. acedido em 04/2020.
- [54] Silêncio, <https://www.silencio.pt/wp-content/uploads/2018/04/2-PM43R.pdf>. acedido em 04/2020.
- [55] LACAM, <https://www.passeidireto.com/arquivo/25364547/tabela-de-coeficientes-de-absorcao-sonora>. acedido em 04/2020.
- [56] Lennox, <https://www.lennoxemea.com/pt/product/energy-advanced/>. acedido em 04/2020.
- [57] Christie & Grey, <https://www.christiegrey.com/downloads/marinflex-and-rubber-turret-mounting/>. 04/2020.
- [58] Alpha Acoustiki, <https://alphacoustic.com/en/product/metal-noise-barrier/>. acedido em 04/2020.
- [59] Beranek L. & Vér I. - *Noise and vibration control engineering, Second Edition*. John Wiley & Sons. 2006.
- [60] Trox Technik, https://www.contimetra.com/Conteudos_F/AC/cadernostecnicos/caderno_tecnico_atenuadores_som.pdf. acedido em 04/2020.
- [61] Rondo, <https://www.architectureanddesign.com.au/getattachment/5a553f11-01cc-462f-aa11-13822d01645e/attachment.aspx>. acedido em 05/2020.
- [62] Amorim Cork Composites, https://amorimcorkcomposites.com/media/4929/u85_acousticcork-2018.pdf. acedido em 05/2020.
- [63] Saint-Gobain, <https://www.sgpam.com.br/produtos/tubos-e-conexoes-para-drenagem-de-aguas-pluviais-sistema-por-gravidade/abracadeira-antivibratil>. acedido em 05/2020.