



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Tânia Cristina da Rocha Fortes

Estudo da qualidade acústica dos anfiteatros  
da Universidade do Minho – Campus de  
Azurém

Estudo da qualidade acústica dos anfiteatros da  
Universidade do Minho – Campus de Azurém

Tânia Cristina da Rocha Fortes

UMinho | 2013

outubro de 2013



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Tânia Cristina da Rocha Fortes

Estudo da qualidade acústica dos anfiteatros  
da Universidade do Minho – Campus de  
Azurém

Tese de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil / Perfil de Construções

Trabalho efetuado sob a orientação da  
Professora Doutora Sandra Monteiro da Silva

## AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer aos meus pais, Deolinda e Adélio, porque sem eles não seria possível realizar o meu sonho de estudar. Obrigada pelo apoio e pelo esforço ao longo destes longos anos.

Agradeço ao meu noivo, Michael, que conheci nesta academia e que me deu muita força para que nunca olhasse para trás. Obrigada pelo amor, apoio, pela paciência ao longo destes anos, por me levatares quando eu mais precisei e me fazeres encarar as coisas. Obrigada por estares sempre ao meu lado.

Agradeço aos meus amigos, David, Anabela, Patrícia e Mariana por estarem sempre presentes, tanto nos bons como nos maus momentos. Foram bons anos que passamos, de estudo, de amizade, de companheirismo e de entreaajuda. Obrigada por tudo!

Aos meus irmãos e às minhas cunhadas obrigada por me acompanharem ao longo deste percurso e ao longo da minha vida. À minha afillhada Clara, por todo o carinho.

À minha Orientadora, Professora Sandra Silva, que esteve sempre disponível e pronta a responder a qualquer questão e ajudar no que fosse preciso, Muito Obrigada.

Ao Miguel Oliveira, desenhador, e Leonel Vieira, colega, que se disponibilizaram a ajudar na fase final da minha dissertação na parte de desenho (SketchUp e AutoCAD) muito obrigada pela grande ajuda prestada.

Ao Professor Ricardo Fonseca pelos esclarecimentos dados no *software* EASE, um grande Obrigada.

Obrigada também aos professores e alunos que me responderam aos inquéritos e a todos os meus professores da Universidade do Minho que me seguiram ao longo destes anos.

A toda a minha família que me esteve sempre a apoiar, muito abrigada e que Deus vos ajude como me ajudou também.

Ao engenheiro Daniel do Laboratório de Física e Tecnologia das Construções pelo tempo despendido a ensinar-me a trabalhar com os equipamentos de medições de acústica.

Não podia deixar também de lembrar o meu melhor amigo, que nunca me abandona em algum momento e que está sempre pronto para brincar e me fazer sorrir mesmo quando os momentos de tensão são maiores, o meu *Big*.



## RESUMO

As condições acústicas de um espaço devem proporcionar um ambiente sonoro adequado às atividades que aí são desenvolvidas, especialmente nos locais destinados à palavra, como por exemplo as salas de aulas e os anfiteatros.

O objetivo desta dissertação é o estudo da qualidade acústica, em especial a qualidade da audição da palavra durante as aulas, dos anfiteatros da Universidade do Minho, no Campus de Azurém.

Para a realização deste estudo foram selecionados anfiteatros das escolas do Campus de Azurém, e realizaram-se estudos para a avaliação do tempo de reverberação.

Com estes estudos foram identificados os principais problemas existentes a nível da acústica de salas e foram propostas algumas soluções de reabilitação acústica, enquadrada com as características do espaço.

Para além da avaliação do tempo de tempo de reverberação, que foi efetuado por ensaios “*in situ*”, também se fez a avaliação subjetiva baseada em inquéritos aos alunos e professores que frequentam os anfiteatros em estudo.

Palavras-Chave: **Anfiteatros, Qualidade acústica, Acústica de salas, Audição da palavra, Tempo de reverberação.**



## **ABSTRACT**

The acoustic conditions of a space or area should offer a sound environment that is adequate to its purpose or activities, especially in places where vocal communication is vital, such as classrooms and lecturing halls.

The objective of this dissertation is the study of acoustic quality, especially towards the quality of hearing words during class at the amphitheaters of the University of Minho, Campus of Azurém.

For this study a number of amphitheaters were selected from schools of Campus Azurém, and studies were conducted to evaluate time reverberation.

These studies identified main acoustic problems that exist within classrooms and various restoration solutions were proposed in order to satisfy the acoustic needs, given the purpose and type of space or room.

In addition, with the help of students and professors that attend these amphitheaters, subjective evaluations based on surveys were accomplished.

**Keywords: Amphitheaters, Acoustic quality, Acoustics of rooms, Hearing words, Reverberation Time.**



## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUÇÃO AO TEMA DA DISSERTAÇÃO .....</b>	<b>3</b>
1.1. ENQUADRAMENTO .....	3
1.2. OBJETIVOS .....	8
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	10
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>11</b>
<b>2. CONCEITOS TEÓRICOS.....</b>	<b>13</b>
2.1. CONCEITOS ACÚSTICOS .....	20
2.2. ACÚSTICA DE SALAS PARA A AUDIÇÃO DA PALAVRA .....	25
2.3. CONFORTO ACÚSTICO .....	28
2.4. APLICAÇÃO DAS NORMAS .....	29
2.5. MATERIAIS E SISTEMAS DE ABSORÇÃO.....	30
2.5.1. TIPOS DE MATERIAIS E SISTEMAS DE ABSORÇÃO.....	31
2.5.2. <i>Materiais porosos</i> .....	31
2.5.3. <i>Sistemas ressonantes</i> .....	33
2.5.4. <i>Difusores</i> .....	35
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>37</b>
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>39</b>
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS ANFITEATROS EM ESTUDO.....	39
3.1.1. <i>Anfiteatro do Edifício B – B1.12</i> .....	40
3.1.2. <i>Anfiteatro da Escola de Ciências – EC1.03</i> .....	42
3.1.3. <i>Anfiteatro da Escola de Engenharia – EE0.19</i> .....	43
3.1.4. <i>Anfiteatro da Escola de Arquitetura – EA2.05</i> .....	44
3.2. MEDIÇÕES ACÚSTICAS NOS ANFITEATROS - EQUIPAMENTOS.....	47
3.2.1. <i>Descrição dos Equipamentos</i> .....	47
3.3. DESCRIÇÃO DAS MEDIÇÕES DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO NOS ANFITEATROS .	48
3.4. DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS DE REVERBERAÇÃO DE ACORDO COM A EQUAÇÃO DE SABINE.....	49

3.5.	TRATAMENTO DE DADOS DO SONÓMETRO PARA O TEMPO DE REVERBERAÇÃO	50
3.6.	INQUÉRITOS .....	51
3.7.	EASE SOFTWARE.....	51
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>		<b>55</b>
<b>4.</b>	<b>APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>57</b>
4.1.	CÁLCULO DO LIMITE REGULAMENTAR ( $T_{\text{REGULAMENTAR}}$ ) .....	57
4.2.	PREVISÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO USANDO A EQUAÇÃO DE SABINE .....	57
4.2.1.	<i>Medição do Tempo de Reverberação .....</i>	<i>60</i>
4.3.	INQUÉRITOS .....	66
4.3.1.	<i>Inquéritos dos Alunos .....</i>	<i>66</i>
4.3.2.	<i>Inquéritos dos Docentes .....</i>	<i>74</i>
4.4.	APLICAÇÃO DO EASE SOFTWARE PARA MODELAÇÃO ACÚSTICA DOS ANFITEATROS .....	77
4.5.	DESCRIÇÃO DAS SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO PROPOSTAS.....	79
4.5.1.	<i>Anfiteatro B1.12 .....</i>	<i>81</i>
4.5.2.	<i>Anfiteatro EA2.05 .....</i>	<i>83</i>
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>		<b>85</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>87</b>
5.1.	CONCLUSÃO.....	87
5.2.	TRABALHOS FUTUROS.....	89
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>		<b>91</b>
BIBLIOGRAFIA.....		93
<b>ANEXOS .....</b>		<b>97</b>
ANEXO 1 .....		99

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Especto sonoro. ....	4
Figura 2 – Efeitos do ruído no Homem. ....	6
Figura 3 – Representação dos edifícios do Campus de Azurém. ....	9
Figura 4 – Ondas Sonoras.....	14
Figura 5 – Comprimento de onda. ....	15
Figura 6 – Gama de pressões audíveis. ....	15
Figura 7 – Campo sonoro direto, no exterior.....	16
Figura 8 – Reflexão do som.....	16
Figura 9 – Reverberação.....	17
Figura 10 – Absorção sonora.....	17
Figura 11 – Difração do som. ....	18
Figura 12 – Espectro sonoro – Identificação de sons audíveis pelo ser humano. ....	19
Figura 13 – Reverberação do som. ....	20
Figura 14 – Tempo de reverberação. ....	20
Figura 15 – Tempos de reverberação para diferentes tipos de utilizações em função do recinto. ....	22
Figura 16 – Som direto e indireto (refletido).....	26
Figura 17 – Encontro de uma onda acústica com superfícies com características diferentes. ....	30
Figura 18 – Materiais porosos – aglomerados de madeira e espumas.....	32
Figura 19 – Painel ressonante.....	33
Figura 20 – Membrana ressonante.....	34
Figura 21 – Ressorador de Helmholtz. ....	34
Figura 22 – Difusores ccústicos. ....	35

Figura 23 – Vista do Campus com indicação aproximada dos anfiteatros.....	40
Figura 24 – Planta B1.12.....	41
Figura 25 – Vista geral do Anfiteatro B1.12 e dos materiais de revestimento e mobiliário que o constituem. ....	41
Figura 26 – Planta EC1.03.....	42
Figura 27 – Vista geral do Anfiteatro EC1.03 e dos materiais de revestimento e mobiliário que o constituem. ....	43
Figura 28 – Planta EE0.19.....	44
Figura 29 – Vista geral do Anfiteatro EE0.19 e dos materiais de revestimentos e mobiliário que o constituem. ....	44
Figura 30 – Planta EA2.05. ....	45
Figura 31 – Vista geral do Anfiteatro EA2.05 e dos materiais de revestimentos e mobiliário que o constituem. ....	45
Figura 32 – Equipamentos – Sonómetro, Microfone e Pré-Amplificador, Fonte Sonora, Calibrador Acústico e Gerador de Ruído. ....	47
Figura 33 – Calibração do Sonómetro.....	48
Figura 34 – Vista geral do Anfiteatro B1.12 desenhado no SketchUp.....	52
Figura 35 – Vista geral do Anfiteatro EC1.03 desenhado no SketchUp. ....	52
Figura 36 – Vista geral do Anfiteatro EE0.19 desenhado no SketchUp. ....	53
Figura 37 – Vista Ggeral do Anfiteatro EA2.05 desenhado no SketchUp.....	53
Figura 38 – $T_{60}$ calculado e $T_{regulamentar}$ no B1.12.....	58
Figura 39 – $T_{60}$ calculado e $T_{regulamentar}$ no EA2.05. ....	59
Figura 40 – $T_{60}$ calculado e $T_{regulamentar}$ no EC1.03. ....	59
Figura 41 – $T_{60}$ calculado e $T_{regulamentar}$ no EE0.19.....	59
Figura 42 – B1.12 com pontos de medição. ....	61
Figura 43 – EC1.03 com pontos de medição.....	61
Figura 44 – EE0.19 com pontos de medição. ....	62

Figura 45 – EA2.05 com pontos de medição. ....	62
Figura 46 – $T_{60}$ medido - Anfiteatro B1.12.....	63
Figura 47 – $T_{60}$ medido - Anfiteatro EC1.03. ....	63
Figura 48 – $T_{60}$ medido - Anfiteatro EE0.19. ....	64
Figura 49 – $T_{60}$ medido - Anfiteatro EA2.05.....	64
Figura 50 – Resposta dos alunos à questão 1. ....	66
Figura 51 – Resposta dos alunos à questão 2. ....	67
Figura 52 – Resposta dos alunos à questão 3. ....	68
Figura 53 – Resposta dos alunos à questão 4. ....	68
Figura 54 – Resposta dos alunos à questão 5. ....	69
Figura 55 – Resposta dos alunos à questão 6. ....	70
Figura 56 – Resposta dos alunos à questão 7. ....	71
Figura 57 – Resposta dos alunos à questão 8. ....	72
Figura 58 – Resposta dos alunos à questão 9. ....	72
Figura 59 – Geometria do Anfiteatro B1.12 no EASE.....	77
Figura 60 – Geometria do Anfiteatro EA2.05 no EASE. ....	78
Figura 61 – Tempos de Reverberação B1.12 - solução existente.....	78
Figura 62 – Tempos de Reverberação EA2.05 - solução existente. ....	79
Figura 63 – Placas de contraplacado de madeira perfurada e painéis ranhurados. ....	80
Figura 64 – Tr para a primeira reabilitação do Anfiteatro B1.12. ....	82
Figura 65 – Tr para a segunda reabilitação do Anfiteatro B1.12. ....	83
Figura 66 – Tr para a primeira reabilitação do Anfiteatro EA2.05. ....	83
Figura 67 – Tr para a segunda reabilitação do Anfiteatro EA2.05.....	84

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Características objetivas e subjetivas.....	24
Tabela 2 – Características quantitativas dos anfiteatros.....	46
Tabela 3 – Características dos materiais dos anfiteatros. ....	46
Tabela 4 – Coeficiente de absorção sonora do ar. ....	50
Tabela 5 – Coeficiente de absorção sonora dos materiais e objetos.....	50
Tabela 6 – $T_{r \text{ Regulamentar}}$ . ....	57
Tabela 7 – $T_{60 \text{ calculado}}$ para cada anfiteatro por referência. ....	58
Tabela 8 – Valores médios $T_{60 \text{ estimados}}$ . ....	65
Tabela 9 – Coeficientes utilizados na reabilitação dos anfiteatros.....	81

## **ABREVIATURAS**

C80 e C50 – Claridade

DEC – Departamento de Engenharia Civil

D50 – Definição da palavra

EASE – Enhanced Acoustic Simulator for Engineers (software)

EC – Escola de Ciências

EE – Escola de Engenharia

EA – Escola de Arquitetura

EDT – Early Decay Time (Tempo de Decaimento Curto)

FS – Fonte Sonora

G – Fator Força

LFTC – Laboratório de Física e Tecnologia das Construções

RASTI – Room Acoustics or Rapid Speech Transmission Index (Índice Rápido de Transmissão da Palavra)

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

ISO – International Organization for Standardization

STI – Speech Transmission Index (Índice de Transmissão da Palavra)

Tr – Tempo de Reverberação

Ts – Tempo Central

## **SIMBOLOGIA E UNIDADES**

$c$  – Velocidade do Som

cm – centímetro

dB – Decibel

$f$  – Frequência

$h$  – Altura

Hz – Hertz

$m$  – Coeficiente de absorção sonora do ar

m – Metro

ms – Milissegundo

$S$  – Área da superfície

$T_r$  – Tempo de Reverberação

$V$  – Volume

$\alpha$  – Coeficiente de absorção

$\lambda$  – Comprimento de onda

$\theta$  – Temperatura em °C





*Capítulo 1*



## **1. Introdução ao Tema da Dissertação**

### **1.1. Enquadramento**

A sala de aula é um espaço importante para a aprendizagem do aluno e por essa razão é essencial que exista uma comunicação adequada entre o locutor e o ouvinte por isso, a qualidade da audição da palavra deve ser adequada para que as matérias lecionadas possam ser perfeitamente compreendidas, isto é, as condições acústicas da sala devem estar ajustadas ao tipo de atividades que aí são desenvolvidas.

No caso dos anfiteatros, quando se estão a desenvolver os projetos de arquitetura, um dos principais aspetos a ser considerados é o desempenho acústico, pois este espaço é destinado a tarefas que exigem altos níveis de concentração por parte de alunos e professores ao longo de várias horas [LORO, 2003].

Um local de trabalho ou de estudo barulhento contribui para aumentar as tensões a que um indivíduo está regularmente sujeito. O ruído pode também provocar irritabilidade em indivíduos geralmente tensos e piorar os estados de angústia em pessoas propensas a depressões e alterar o equilíbrio psicológico das pessoas.

Assim, em certos tipos de atividades o ruído poderá influenciar negativamente o rendimento e a qualidade do rendimento. A irritabilidade e a fadiga que o ruído pode provocar, são fatores diretamente ligados à ocorrência de acidentes.

As dificuldades na transmissão e na receção da mensagem oral através da redução da compreensibilidade da palavra e do efeito de máscara originam o ruído. Este efeito é originado pela sobreposição do ruído nas bandas de frequência utilizadas para a comunicação oral entre as pessoas, sobretudo as bandas que se situam entre 500Hz e 3000Hz e que são as mais importantes para a compreensibilidade [ALMEIDA e SILVA, 2009].

Os sons audíveis situam-se nas bandas de 20Hz a 20000Hz, tal como mostra a Figura 1 sendo, como se refere acima, os mais importantes para a inteligibilidade os chamados Sons Audíveis Médios a Agudos.

INFRA-SONS	SONS AUDÍVEIS			ULTRA-SONS
	GRAVES	MÉDIOS	AGUDOS	
0	20	400	1600	20000
f(Hz)				



Figura 1 – Espectro sonoro.

Num determinado local, como por exemplo nos anfiteatros, as condições acústicas ideais dependem das características desse anfiteatro e das atividades que neles são desenvolvidas: a audição da palavra, a clareza e a inteligibilidade da palavra.

Nos anfiteatros onde a qualidade da audição da palavra é importante, deve-se assegurar a nitidez da voz pronunciada e que esta não seja distorcida por ecos nem reverberações excessivas por parte dos espaços pois pode comprometer a clareza da audição por parte dos recetores.

Uma vez que os ecos e a reverberação excessiva interferem diretamente na compreensão, ensino e aprendizagem e provocam grande desgaste físico e psicológico em alunos e professores, deverão ser analisados para descobrir a sua eficiência e ineficiência acústica.

O ruído, tanto externo como interno, influencia o desenvolvimento do aluno. O conforto acústico deve ser garantido para que não existam problemas de comunicação entre professor e alunos. Para que isto aconteça existem padrões acústicos que têm que estar ajustados, como por exemplo, o tempo de reverberação, tempo de decaimento curto, índice de transmissão rápida da palavra, clareza e definição. Estes parâmetros são influenciados pela localização da fonte sonora, pela geometria interna do anfiteatro, pelos materiais de revestimento de paredes, pavimentos, tetos, chãos, cadeiras, etc., e suas características [BRAGA, 2009].

Assim, é necessário caracterizar as salas de aula e os anfiteatros, relativamente à sua qualidade acústica para a audição da palavra. Esta avaliação é realizada mediante um conjunto de características acústicas que se encontram divididas de acordo com a natureza objetiva ou subjetiva das mesmas.

As características de natureza objetiva referem-se a parâmetros físicos calculáveis que se relacionam fortemente com as características arquitetónicas do espaço, enquanto as de

natureza subjetiva correspondem aos atributos psicofísicos/acústicos identificados subjetivamente por um ouvinte.

A sociedade civil e as autoridades governamentais têm tido um grande interesse, nos últimos anos, nas questões relacionadas com a acústica, no que respeita a habitações, escritórios, espaços comerciais ou unidades industriais. Sabe-se que reduzindo os níveis sonoros no quotidiano das pessoas, está-se a melhorar a qualidade de vida e a contribuir para uma melhoria na saúde.

Em vários países e em Portugal também, os requisitos legais impostos pelas autoridades abrangem uma vasta gama de características tais como: os níveis sonoros, o isolamento a sons aéreos e de percussão e o tempo de reverberação.

A base dos primeiros estudos sobre acústica arquitetural, realizados por Sabine foram os edifícios de ensino e num dos muitos estudos seguintes que foram realizados refere que a acústica das escolas é uma propriedade física essencial que determina o sucesso do edifício, assim, a eliminação do ruído e a redução da reverberação nas salas de aula, são pontos indispensáveis para a função de ensino oral. No entanto, esses conhecimentos não foram, nem são postos em prática, integralmente, até aos dias de hoje, o que leva a existirem ainda condições acústicas fracas em salas de aula, que se traduzem na fraca apreensão de conhecimentos dos alunos, assim como o desgaste e fadiga dos docentes [BASTOS, 2010].

A poluição sonora é hoje em dia um dos problemas mais preocupantes que se vive no planeta. Esta provoca inúmeros distúrbios e lesões e é conhecida pelo Homem, mais vulgarmente, por ruído.

O ruído é um grave problema para a saúde do Homem pois tem nele vários efeitos prejudiciais. O ruído lesa não só o sistema auditivo, podendo mesmo chegar à sua perda, dependendo do tipo de ruído, mas também outros efeitos prejudiciais ao corpo humano, como mostra a Figura 2.

O ruído extremo (súbito e intenso) é prejudicial ao Homem a um nível elevado, podendo causar graves problemas de saúde se não forem tomadas as devidas precauções.

As crianças que estejam em ambientes de baixa qualidade acústica podem ficar com a motivação afetada pois não se conseguem concentrar tão bem como se estivessem num local com boa qualidade acústica, levando assim a mudanças no seu comportamento como comportamentos agressivos e fácil irritabilidade [ZWIRTES, 2006].

A compreensão da audição é fundamental no processo de comunicação entre alunos e professor numa sala de aula, não basta apenas ouvir o que o professor está a falar mas também é preciso perceber e entender as suas palavras e para isso é preciso atenção, concentração por parte dos alunos [LOSSO, 2003].

Também os professores são prejudicados com uma má qualidade acústica das salas mas estes devido a problemas na fala. A comunicação é o seu método de trabalho, é através dela que o professor exerce a sua função e por isso a voz não pode sofrer perturbações devido à má qualidade da acústica de salas, pois teriam problemas tanto o professor pela sua saúde como os alunos pois não poderiam aprender [LOSSO, 2003].

Uma sala mal projetada acusticamente pode prejudicar a saúde vocal do professor pois este, devido ao ruído de fundo que se possa formar na sala oriundo de vários fatores, tem que elevar a voz, esforçando-a e podendo causar problemas graves nas cordas vocais, devido à fadiga destas, ao longo do tempo. Com o passar dos anos o professor pode começar a ter vários problemas como rouquidão, dores nas cordas vocais e na garganta, perda na capacidade normal da fala, efeitos colaterais como dores de cabeça,



Figura 2 – Efeitos do ruído no Homem [ALMEIDA e SILVA, 2009].

entre outros que podem levar mesmo a que os professores tenham que se afastar, em casos extremos, da sua atividade profissional para recuperação pessoal [LOSSO, 2003].

A comunicação verbal é a forma que o professor utiliza para transmitir a palavra ao aluno, e a propagação da comunicação verbal (da fala) depende da acústica do anfiteatro. Um bom desempenho acústico de um anfiteatro assegura que a comunicação e a troca de informações sejam efetuadas eficientemente.

Os anfiteatros são em regra salas grandes e altas, com tetos falsos e com materiais rígidos o que provoca grande reverberação e muitos ecos, conseqüentemente uma má compreensibilidade da palavra, logo não satisfazem as exigências de audição da palavra, e por vezes a palavra não é audível nas últimas filas do anfiteatro e o emissor fica desgastado.

A reverberação e ruído são importantes para a inteligibilidade da fala e existem requisitos mínimos, na legislação Portuguesa, referentes a salas de aulas e anfiteatros que a principal função é a de aumentar a percetibilidade da palavra reduzindo o tempo de reverberação através dos valores limites estabelecidos. Em alguns anfiteatros o tempo de reverberação excede os valores estabelecidos reduzindo a inteligibilidade da fala e reduzindo a capacidade de audição da palavra. Estes problemas de reverberação interna nos anfiteatros podem ser resolvidos com a introdução de soluções acústicas interiores adequadas.

A legislação em vigor em Portugal que define critérios mínimos a considerar em estabelecimentos de ensino, com o intuito de melhorar a qualidade na aprendizagem é o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios aprovado pelo Decreto-Lei nº 96/2008 de 9 de Junho. Esta legislação especifica critérios nos vários espaços escolares, salas de aula, auditórios e ginásios em relação ao isolamento sonoro.

Para quantificar a qualidade acústica de salas existem vários parâmetros que podem ser determinados. Nesta dissertação será apenas abordado o tempo de reverberação.

Assim, irá realizar-se um estudo da qualidade acústica dos anfiteatros da Universidade do Minho, Campus de Azurém, fazendo uma avaliação do tempo de reverberação para verificar se a qualidade da palavra é assegurada durante as aulas.

## 1.2. Objetivos

O objetivo desta dissertação consiste no estudo da qualidade acústica de quatro anfiteatros, um de cada um dos edifícios das escolas existentes do Campus de Azurém, da Universidade do Minho.

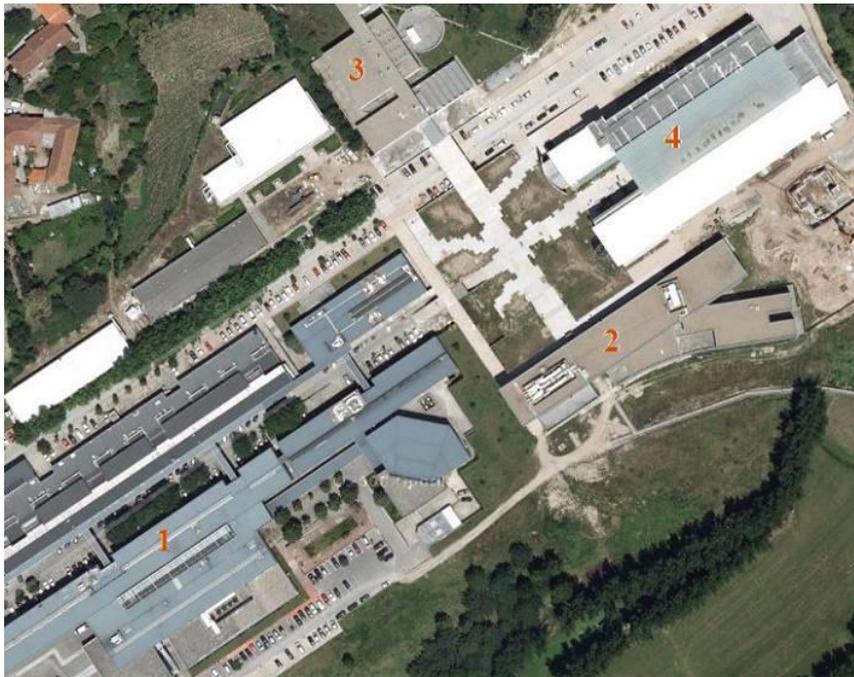
Efetuuou-se uma caracterização dos anfiteatros, identificando os principais problemas que estes apresentam a nível acústico.

Para a realização deste estudo, em cada anfiteatro selecionado, foi efetuado um estudo da qualidade acústica realizando uma avaliação do tempo de reverberação para verificar se a qualidade da audição da palavra é assegurada.

Foram propostas soluções de reabilitação acústica enquadradas com as características do espaço.

Para a realização desta dissertação, para além de pesquisa bibliográfica e análise da mesma, também foram realizados ensaios “*in situ*” para a avaliação do tempo de reverberação dos anfiteatros e posterior identificação dos principais problemas existentes nos mesmos, a nível da acústica de salas.

Os anfiteatros estudados localizam-se nos edifícios do Campus de Azurém, e designam-se por Novo Edifício da Escola de Engenharia, Escola de Ciências, Escola de Arquitetura, Edifício B, Fase I da Escola de Engenharia. Estes edifícios são representados na Figura 3.



- 1 - Edifício B, Fase I da Escola de Engenharia
- 2 - Escola de Ciências
- 3 - Escola de Arquitetura
- 4 - Escola de Engenharia

Figura 3 – Representação dos edifícios do Campus de Azurém [Google Maps].

Os ensaios “*in situ*” foram realizados com os equipamentos de medição acústica cedidos pelo Laboratório de Física e Tecnologia das Construções da Universidade do Minho. Estes equipamentos são o sonómetro, a fonte sonora, o gerador de ruído, o tripé, o calibrador acústico e os respetivos cabos de ligação, que serão apresentados no capítulo 3.

Posteriormente, tanto a situação existente como a solução de reabilitação, de dois dos anfiteatros escolhidos, foram analisadas com o auxílio do *EASE software*.

Foram ainda aplicados inquéritos aos utilizadores dos espaços em estudo para se conhecer as suas opiniões e assim poder identificar os principais problemas acústicos percecionados pelos alunos e professores que usam os anfiteatros.

Após a realização deste estudo e análise dos resultados definiu-se um conjunto de soluções de reabilitação acústica, enquadrada com as características do espaço.

### **1.3. Organização do trabalho**

Este trabalho está dividido em 5 capítulos.

No capítulo 1 faz-se uma Introdução ao Tema da Dissertação, enquadrando o tema indicando-se os objetivos e a metodologia do trabalho e também se apresenta a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 abordam-se conceitos teóricos relacionados com o tema da avaliação acústica tais como: conceitos básicos de acústica, conceitos relacionados com a propagação do som em recintos fechados, parâmetros de avaliação acústica e sua relação com a perceção sonora e é também abordado o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, regulamento utilizado nesta dissertação. Também neste capítulo se apresenta uma breve elucidação dos sistemas de absorção sonora existentes.

O 3º capítulo é o capítulo onde é apresentada Metodologia seguida na dissertação. Neste capítulo descreve-se os equipamentos utilizados para a realização das medições acústicas, caracterizam-se os anfiteatros em estudo, em termos de geometria e materiais que os constituem, faz-se uma descrição das medições, explica-se o tratamento de dados dos tempos de reverberação obtidos no sonómetro e pela Equação de Sabine e explica-se o EASE *software*

O capítulo 4 diz respeito à Apresentação de Resultados e à sua Discussão. Neste capítulo apresentam-se as medições e os resultados das medições dos tempos de reverberação, apresenta-se a modelação acústica dos anfiteatros na aplicação do *software* a utilizar, analisam-se os inquéritos, e faz-se uma descrição das soluções a adotar.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões desta dissertação e se apresentam propostas de trabalhos futuros.

No final da presente dissertação são apresentadas as Referências Bibliográficas utilizadas e os Anexos.

*Capítulo 2*



## 2. Conceitos teóricos

Atualmente, fala-se e ouve-se falar muito de acústica e de conforto acústico e existe um crescente interesse no estudo desta área com o objetivo de controlar os níveis de ruído e o ambiente sonoro do interior de um espaço, para que assim haja um conforto acústico adequado para os ocupantes do espaço.

Mas o que é a acústica? A Acústica é a ciência, do ramo da Física, que estuda o som, a sua propagação em meios fluidos, os chamados sons aéreos, e sólidos, os sons de percussão. Esta ciência pretende garantir a qualidade da audição da palavra (arquitetural ou de salas) e as inter-relações do som com o ser humano numa perspetiva de efeitos causados, sejam eles agradáveis (música, voz) ou desagradáveis (ruído). A Acústica Arquitetónica é o ramo mais antigo da Acústica. Esta procura tornar, as salas de concertos e espetáculos e outros locais de reuniões, aptas para a escuta da música e da palavra. Em meados do século XX desenvolveu-se a Acústica das Construções e esta preocupou-se em proporcionar condições de conforto acústico aos ocupantes dos edifícios, dando-lhes um ambiente acústico adequado às suas atividades [ALMEIDA e SILVA, 2009; BASTOS, 2010].

A acústica estuda o som e o som é a sensação provocada pelas vibrações provocadas no ouvido, é a vibração das partículas de ar que rodeia os indivíduos. É a sensação auditiva que advém de uma onda acústica, por extensão e vibração acústica capaz de despertar o sistema auditivo-cerebral. Resulta da propagação das ondas sonoras que são provocadas por um corpo em vibração, como já foi referido. Todos os corpos que emitem som têm de ser capazes de vibrar e a estes são chamados fontes sonoras [ALMEIDA e SILVA, 2009; TECNIWOOD, 2013; CARVALHO, 2010].

O som propaga-se provocando uma série periódica e sucessiva de compressões e rarefações num determinado meio que seja sólido, líquido ou gasoso pois o som não se propaga no vácuo. Por outras palavras, o som é uma sensação auditiva que resulta de variações de pressão do ar, tendo origem numa fonte de vibração. As ondas sonoras, como mostra a Figura 4, resultam das oscilações das moléculas do meio de propagação,

em torno das suas posições de equilíbrio [ALMEIDA e SILVA, 2009; TECNIWOOD, 2013; CARVALHO, 2010].

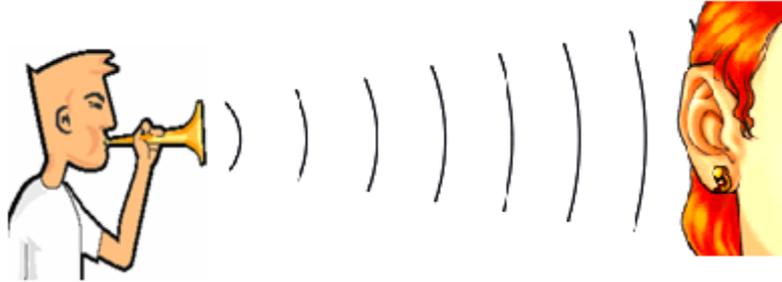


Figura 4 – Ondas sonoras.

A frequência ( $f$ ) é uma das características fundamentais do som e é definida como o número de variações/oscilações de pressão da fonte emissora por unidade de tempo (período -  $T$ ). A sua unidade é o Hertz (Hz) [CARVALHO, 2010].

O comprimento de onda ( $\lambda$ ) é a distância percorrida pelo som durante um período de uma vibração, ou seja, é a distância entre dois pontos semelhantes seguidos da onda periódica. Na Figura 5 pode-se observar a diferença entre os diferentes tipos de comprimentos de onda assim como as diferentes frequências. A relação entre o comprimento de onda e a frequência é dada pela Equação 1 [TECNIWOOD, 2013].

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Sendo:

$c$  – velocidade do som.

No caso do meio de propagação se tratar do ar, a velocidade do som é obtida pela Equação 2:

$$c = (333,4 + 0,6 * \theta); \quad (2)$$

$\theta$  – Temperatura em graus Celcius (°C).

$f$  – frequência (Hz).

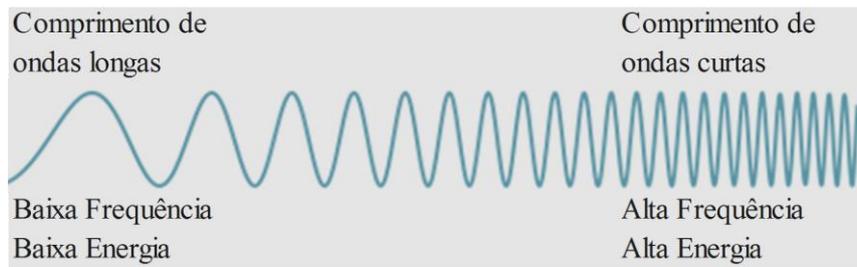


Figura 5 – Comprimento de onda.

Na Figura 6 representa-se uma escala de pressão sonora em decibel (dB) que apresenta a sensibilidade do ouvido humano relativamente aos sons.

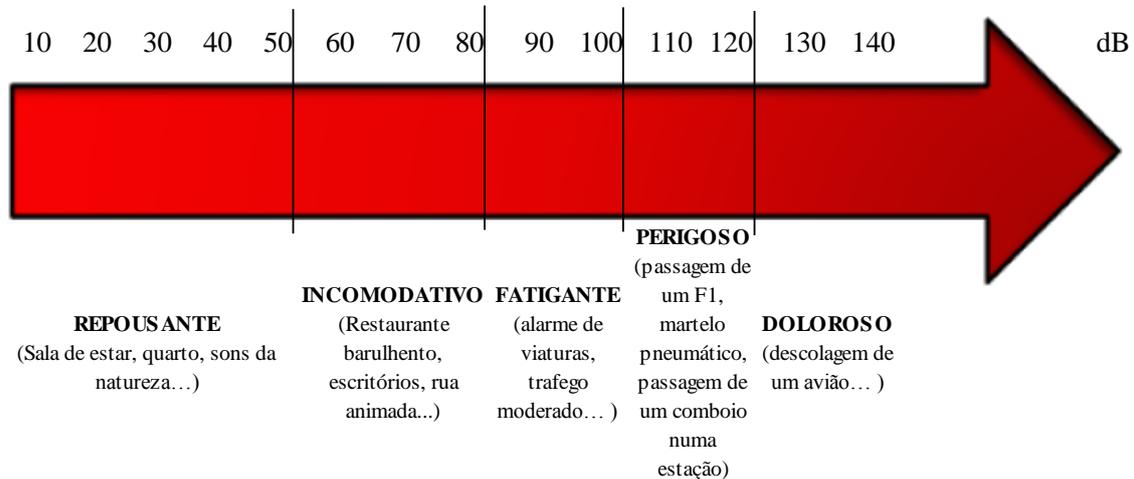


Figura 6 – Gama de pressões audíveis.

A partir da fonte de origem o som propaga-se em todas as direções incidindo nas superfícies que encontrar. Ao bater nessas superfícies vai originar vários fenómenos, dependendo do tipo de superfície. As ondas sonoras podem ser refletidas, refratadas ou difratadas.

O campo sonoro direto, Figura 7, é o som que se propaga diretamente entre o emissor e o recetor, sem que haja distorção dos sons produzidos pelo emissor. Nestes casos considera-se um ambiente exterior e tem que se ter em conta que parte da energia sonora emitida nunca será recebida pelo recetor [CARVALHO, 2012; PEREIRA, 2010].

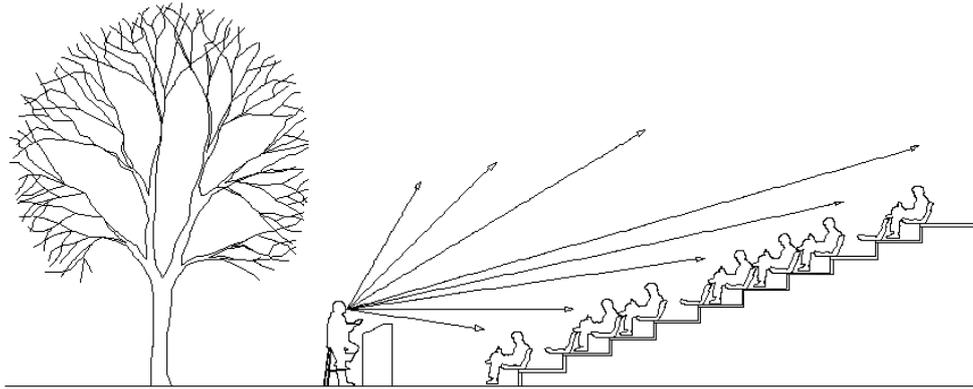


Figura 7 – Campo sonoro direto, no exterior [PEREIRA, 2010].

A Reflexão do som de uma onda sonora ocorre quando esta, no interior de uma sala, encontra um obstáculo e inverte o sentido de propagação ou seja, os sons refletidos são devolvidos ao espaço e propagam-se até ao ouvinte que já inicialmente esteve sujeito ao campo sonoro direto, como se pode verificar na Figura 8 [CARVALHO, 2012; PEREIRA, 2010].

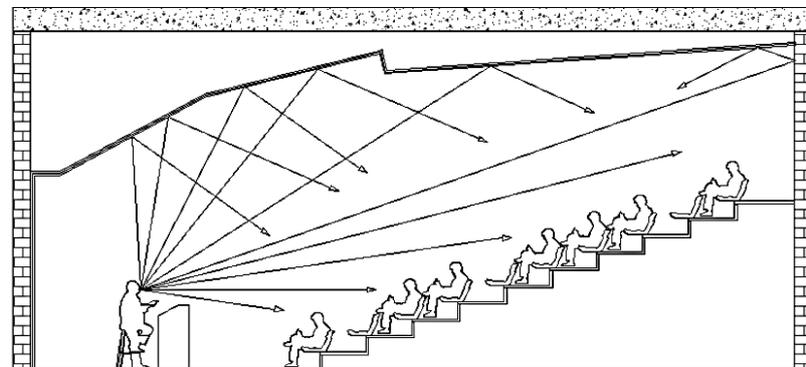


Figura 8 – Reflexão do som [PEREIRA, 2010].

A reflexão, pode originar ser originada por meio de dois fenómenos: o eco e a reverberação.

O eco é uma reflexão sonora de um som que chega ao ouvinte pouco tempo depois do som original ter chegado [ZWIRTES, 2006].

Na reverberação não há um intervalo mínimo de 0,1 segundos entre os dois sons, pelo que o ouvido humano não consegue distingui-los, havendo assim um reforço do som original. Assim que o som é gerado, este propaga-se no espaço em várias direções

incidindo sobre as superfícies e refletindo inúmeras vezes (Figura 9). Nestas reflexões a energia vai-se perdendo devido à absorção por parte das superfícies, reduzindo assim a energia de reflexão [BRAGA, 2009].

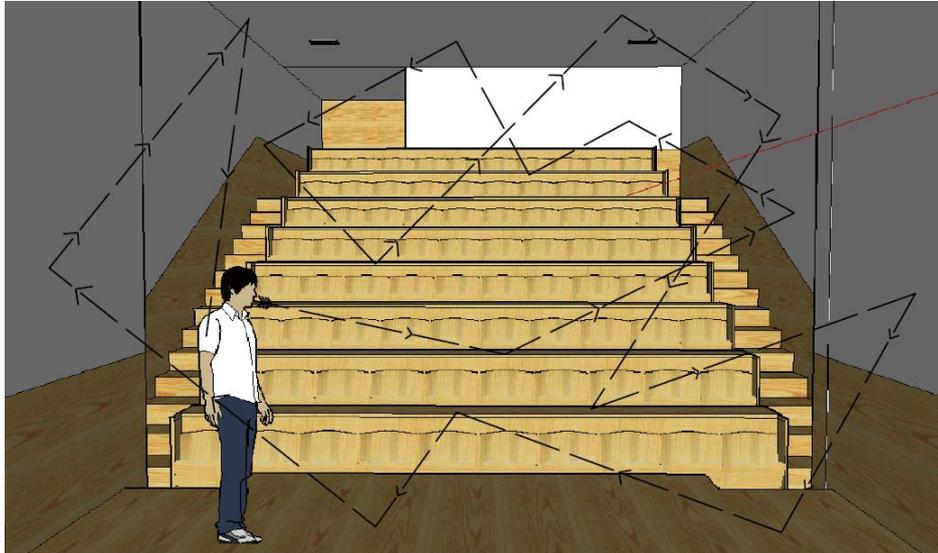


Figura 9 – Reverberação do som.

A absorção sonora, Figura 10, é a propriedade que os materiais têm de transformarem a energia que incide neles noutra tipo de energia, normalmente térmica.

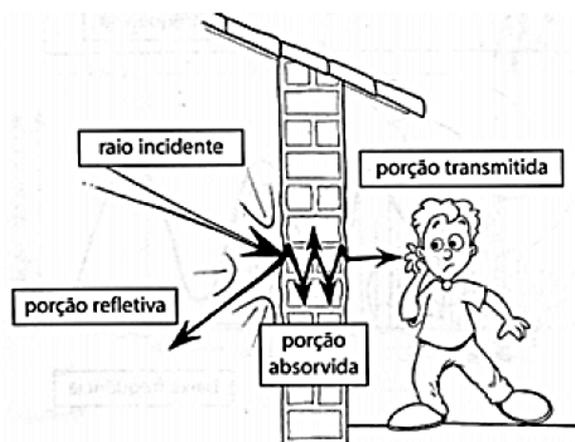


Figura 10 – Absorção sonora [ALMEIDA e SILVA, 2009].

Quanto mais materiais absorventes o espaço tiver, menor o nível de pressão sonora da sala pois a energia das reflexões é reduzida. O coeficiente de absorção ( $\alpha$ ) de cada material varia de 0 (ausência de absorção) a 1 (absorção total) e a absorção sonora dos

materiais varia com a frequência do som emitido e com o ângulo de incidência. Materiais rígidos são maus absorventes enquanto materiais porosos têm coeficientes de absorção elevados, dissipando bem a energia [ZWIRTES, 2006].

Os fenómenos de Refração do som ocorrem quando uma onda passa de um meio para outro distinto, com índice de refração diferente. Aqui a velocidade do som altera-se, assim como o seu comprimento de onda.

O fenómeno de Difração do som, apresentado na Figura 11, é a propriedade que as ondas têm de contornar obstáculos posicionados entre a fonte sonora e o recetor, mudando a sua direção e reduzindo a sua intensidade, dependente do comprimento da onda que se propaga [CARVALHO, 2010].

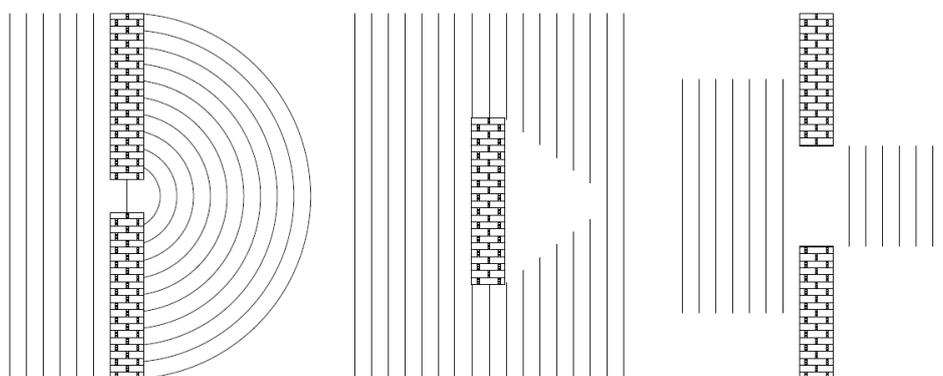


Figura 11 – Difração do som.

O ruído não tem uma descrição exata e correta, no entanto, fisicamente pode ser definido como uma mistura de sons com diferentes frequências.

O ruído pode ser considerado um som sem harmonia e usualmente tem uma conexão negativa, ou não é mais do que um som indesejável [BISTAFSA, 2006; IIDA, 2005].

O ruído pode também ser considerado um som composto por frações de tom que não geram entre si relações elementares, de números inteiros (não são harmónicos) ou têm impulsos sonoros ou séries de impulsos com uma frequência rítmica menor a 16 Hz (como por exemplo marteladas). Existem ruídos que podem alcançar níveis desmedidos, podendo a curto, médio ou longo prazo provocar sérios danos à saúde [ALMEIDA e SILVA, 2009; CATAI, 2006].

O ruído ambiente é o ruído no geral, observado num determinado momento, devido ao conjunto de todas as fontes sonoras que fazem parte da vizinhança próxima ou longínqua do local em estudo. Normalmente, para ser considerado ruído ambiente, este ruído não faz parte desse local. Essas fontes sonoras apareceram na vizinhança, provocando um ruído ambiente não comum [ALMEIDA e SILVA, 2009].

Também existe o ruído de fundo, que nos casos de salas de aulas ou anfiteatros é muito prejudicial.

O ruído de fundo pode ser considerado com todo aquele ruído existente num determinado espaço que não diz respeito ao objeto de medição.

Este ruído de fundo pode ser de várias origens e pode apresentar um grau de mascaramento sobre o orador de modo a interferir na capacidade de compreensão do receptor [ZWIRTES, 2006].

O mascaramento do som, consiste na sobreposição de sons que soam ao mesmo tempo e se misturam, dificultando assim a sua identificação ou seja, o som de maior intensidade sobrepõem-se ao de menor intensidade.

O espectro sonoro é o conjunto dos de todos os sons que são divididos em 3 grandes grupos: os Infra-sons, os Sons Audíveis e os Ultra-sons (Figura 12).

O som audível é constituído pelas ondas sonoras cujas frequências estão compreendidas entre os 20Hz e os 20000Hz e, tal como o nome indica, é capaz de provocar reação ao nível da audição do Homem [BARBOSA, 2009].

Este está dividido em 10 grupos de frequências a que se dão o nome de oitavas e cada uma destas oitavas está dividida em 3 grupos de terços de oitava [BARBOSA, 2009].

Os Infra-sons possuem frequências inferiores a 20Hz e os Ultra-sons possuem frequências superiores a 20000Hz [BARBOSA, 2009].

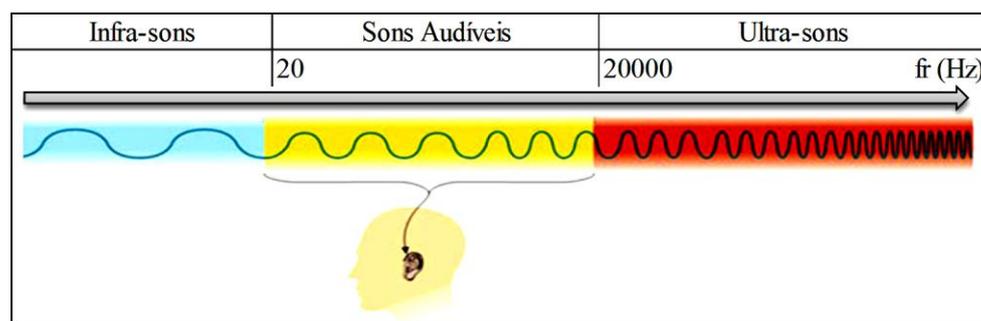


Figura 12 – Espectro sonoro – identificação de sons audíveis pelo ser humano.

## 2.1. Conceitos acústicos

A reverberação é a permanência de um som num espaço fechado ou semifechado, é a sensação de prolongamento do som emitido, (Figura 13) [ALMEIDA e SILVA, 2009].

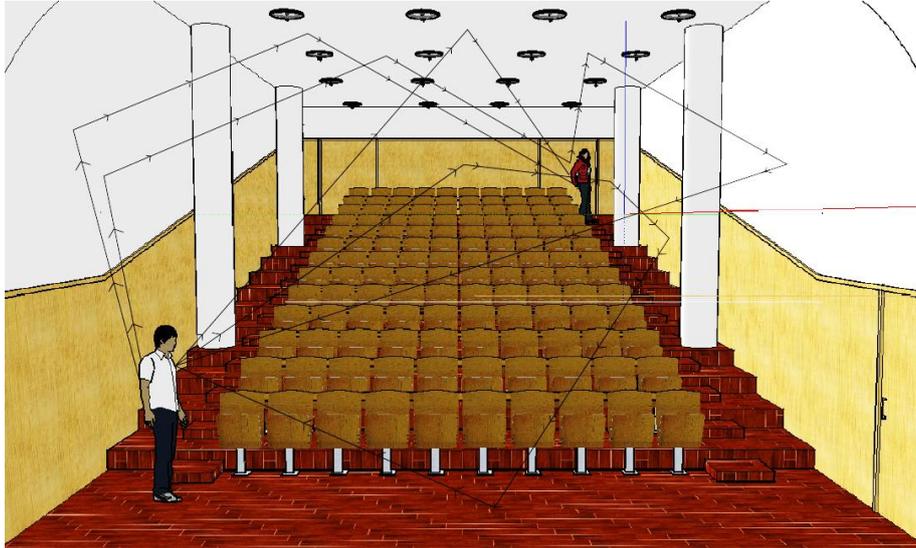


Figura 13 – Reverberação do som.

- **Tempo de Reverberação – Tr**

O tempo de reverberação de um recinto fechado, para uma determinada banda de frequências, corresponde ao intervalo de tempo necessário para que o nível de pressão sonora, nessa banda de frequências, após ter sido interrompida a fonte sonora, decresça 60dB. O gráfico da Figura 14 mostra como é que esse decréscimo ocorre.

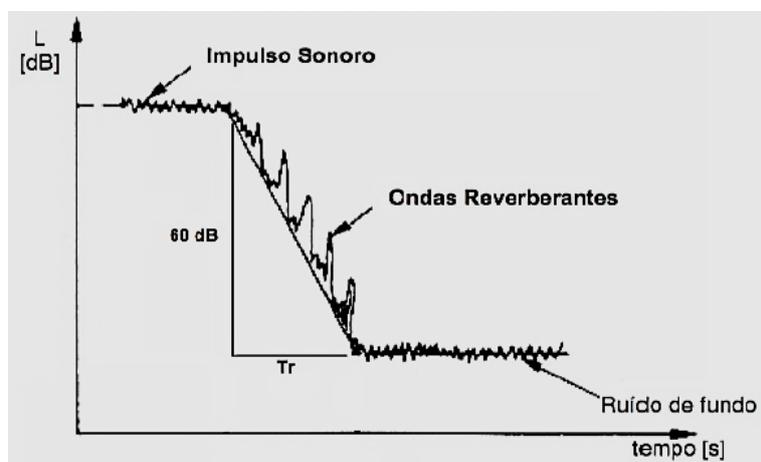


Figura 14 – Tempo de Reverberação [CARVALHO, 2012].

O valor do tempo de reverberação depende da frequência, da absorção sonora dos materiais que integram a envolvente exposta (dos revestimentos ou elementos envolventes), dos objetos que existem no espaço em estudo e do volume do mesmo espaço, isto é, caracteriza o recinto recetor quanto ao decaimento sonoro [ALMEIDA e SILVA, 2009; DEC/LFTC/P03, 2010; IMPERALUM, 2013].

Assim, o Tempo de Reverberação,  $T_r$ , é o intervalo de tempo que um som demora a cessar por completo, depois de várias reflexões [CARVALHO, 2012].

O  $T_r$ , se for em excesso, pode reduzir a inteligibilidade da palavra, porque, devido ao baixo nível das consoantes e o seu curto período de duração estas são ultrapassadas pelas vogais que têm um nível mais elevado e têm uma maior duração, mas para atos musicais, soam notavelmente melhor pois as notas musicais são arrastadas, pois estas não precisam de ser ouvidas individualmente mas como um todo [CARVALHO, 2012].

O tempo de reverberação pode ser obtido por cálculos numéricos ou por medições com equipamentos apropriados.

O grande pioneiro da acústica de salas foi Sabine, que desenvolveu a equação para o  $T_r$ , considerando as características arquitetónicas do ambiente e também as características sonoras dos materiais da envolvente.

A Equação 3 é a designada Equação de Sabine:

$$T_r = \frac{0,16 \cdot V}{4 \cdot m \cdot V + \sum \alpha_i \cdot S_i} \quad (3)$$

Sendo:

$V$  – volume do espaço ( $m^3$ );

$m$  – coeficiente de absorção sonora do ar (Neper/m);

$\alpha_i$  – coeficiente de absorção sonora da superfície  $i$ ;

$S_i$  – área da superfície  $i$  ( $m^2$ ).

Existem valores de referência para os tempos de reverberação de uma sala, dependendo em grande parte do seu volume e do fim a que se destina, como mostra a Figura 15.

Se for uma sala para a audição da palavra, o tempo de reverberação deve ser baixo para que não haja mascaramento da fala e se mantenha a inteligibilidade da palavra [BASTOS, 2010].

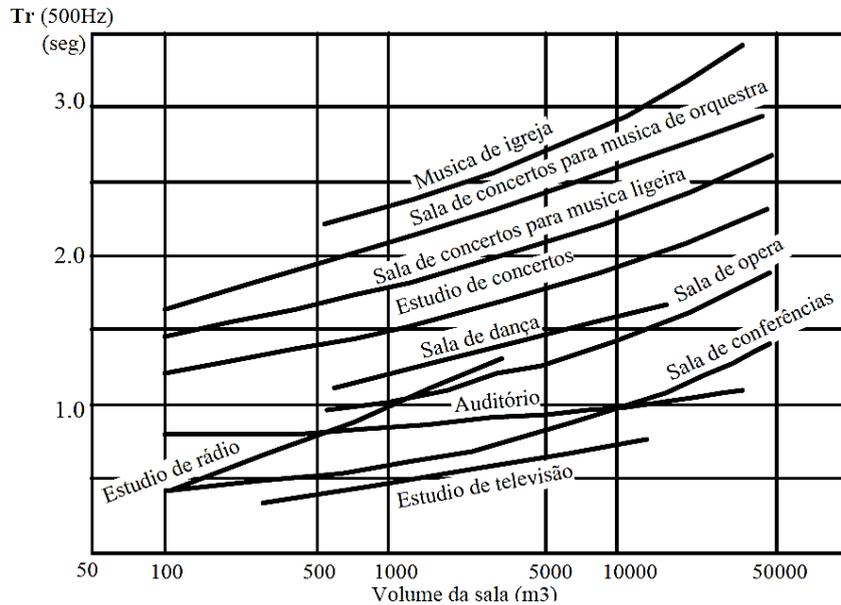


Figura 15 – Tempos de reverberação para diferentes tipos de utilizações em função do recinto [MATEUS, 2008].

- **Tempo de Decaimento Curto – EDT**

O EDT (Early Decay Time ou Tempo de Decaimento Curto também designado como Tempo de Reverberação Inicial) é semelhante ao Tempo de Reverberação (Tr) e está relacionado com a primeira parte do decaimento sonoro de 10dB depois da interrupção da fonte sonora. Os valores de EDT são medidos em segundos e são multiplicados por 6 para que possam ser comparados com o Tr [BRAGA, 2009].

Este parâmetro está mais relacionado com a perceção do ouvinte do que com as propriedades do espaço em estudo e por isso é importante na análise dos parâmetros acústicos subjetivos de um espaço fechado [CARVALHO, 2012].

- **Tempo Central – Ts**

O tempo central corresponde ao instante desde a chegada do som direto, em que a energia recebida antes desse instante iguala a energia recebida depois desse mesmo instante. Este parâmetro foi indicado como medida da clareza sonora e quanto mais

baixo for, mais claro será sentido o som numa sala. Os valores típicos, na gama das frequências médias, podem variar entre 60ms e 260ms [PEREIRA, 2010].

- **Definição da palavra – D50**

A definição indica a relação entre a energia recebida nos primeiros 50ms e a energia total. Quanto maior o valor de  $D_{50}$ , maior a capacidade que o ouvinte tem de diferenciar as sílabas. O seu valor varia entre 0 e 100% e os valores acima de 50% são considerados aceitáveis [BASTOS, 2010].

- **Clareza – C80, C50**

A clareza define-se pela razão entre a energia sonora inicial e a energia reverberada recebida após o instante final. Isto é, é a razão da energia que atinge o ouvinte até 80ms ou 50ms. A clareza (C80 e C50) é usada para avaliar espaços destinados a atuações musicais. A energia que chega ao ouvinte nos primeiros 80ms é considerada benéfica enquanto a que chega depois já é considerada prejudicial. No caso do parâmetro  $C_{50}$ , este é utilizado para a determinação da inteligibilidade da palavra [PEREIRA, 2010; BRAGA, 2009; MASSIERO, 2004].

- **Fator Força – G**

O Fator Força pretende quantificar a capacidade que o espaço tem para amplificar passivamente a intensidade dos sons. Este parâmetro é definido pela razão entre a energia total recebida no interior da sala e a energia recebida em campo aberto a 10 metros da fonte [PEREIRA, 2010].

- **Inteligibilidade da palavra**

A inteligibilidade da palavra num espaço fechado é de cariz primordial para a sua qualidade acústica. Para calcular o índice de inteligibilidade da palavra existem *softwares* e algoritmos que geram índices calculáveis como o STI (índice de transmissão da palavra), e assim é possível classificar qualitativamente a inteligibilidade numa escala de 0 a 5 que se denominam entre inteligibilidade nula e inteligibilidade excelente [CARVALHO, 2012].

A inteligibilidade está diretamente ligada às características e ao tipo de ocupação do espaço. As características podem ser o volume da sala, o nível de ruído de fundo, o tempo de reverberação, o coeficiente de absorção sonora dos materiais, distância e orientação entre o orador e o recetor [ZWIRTES, 2006].

- **Índice de transmissão da palavra (STI) e Índice rápido de transmissão de palavra (RASTI)**

O STI (Speech Transmission Index ou Índice de Transmissão da Palavra) caracteriza a perceção da palavra, sendo que esta, para ser perceptível, deve ser alcançada com o mínimo de deformação possível [CARVALHO, 2012].

O STI é baseado na função de transferência de modulação de frequência e considera os efeitos de reverberação e de interferência do ruído de fundo [BRAGA, 2009].

O RASTI (Room Acoustics or Rapid Speech Transmission Index ou Índice Rápido de Transmissão de Palavra) é uma versão simplificada do STI. Neste parâmetro são usados um número reduzido de bandas de oitava e módulos de frequência. O sinal é composto por bandas de oitava centrais de 500Hz e 2000Hz e é usado para a medição da inteligibilidade em salas onde a palavra é a atividade fulcral [BRAGA, 2009; PEREIRA, 2010].

Os valores destes dois índices, STI e RASTI, variam entre 0 e 1 que corresponde a ininteligível e inteligibilidade perfeita, respetivamente. No entanto, tanto um valor como o outro raramente são atingidos [BRAGA, 2009 PEREIRA, 2010].

Na Tabela 1 agrupam-se algumas das características objetivas acima referidas, relacionando-as com as suas características subjetivas.

Tabela 1 – Características objetivas e subjetivas.

<b>Características Subjetivas</b>	<b>Características Objetivas</b>
Reverberação	Tempo de Reverberação - Tr
	Early Decay Time - EDT
Clareza	Clareza - C80 e C50
	Definição - D50
	Tempo Central - Ts
Loudness	Fator Força - G

## 2.2. Acústica de salas para a audição da palavra

A acústica de salas estuda a forma como o som responde num ambiente arquitetónico particular [CARBONI, 2012].

Uma sala destinada à palavra com boas condições acústicas facilita a aprendizagem, tornando-a mais fácil, mais profunda e menos stressante para o aluno [ZWIRTES, 2006].

Salas para a audição da palavra são espaços destinados ao uso, como o nome indica, da fala e são destinadas a salas de aula, anfiteatros, salas de conferências, ou seja, salas onde haja um orador e uma audiência. Por isso é fundamental que nestes espaços haja uma boa qualidade acústica para proporcionar a inteligibilidade da palavra [PEREIRA, 2010].

Aumentando a razão entre o nível sonoro total dos sons recebidos por um ouvinte num determinado ponto, o chamado *loudness*, e o nível do ruído de fundo na sala, aumenta-se também o grau de inteligibilidade da palavra. Assim, para a conceção de salas para a audição da palavra, deve-se ter alguns fatores em conta, que são condicionantes no grau de inteligibilidade da palavra, como o aspeto de maximizar o *loudness* e uniformizar o nível sonoro sob a área do público, o tempo de reverberação ótimo, e minimizar o ruído de fundo da sala [PEREIRA, 2010].

O ruído, nos dias de hoje, é grande parte do som que é entendido de forma desagradável pelo ouvinte, mesmo este sempre tenha existido. Consequentemente, diz-se que o ruído é um dos maiores fatores de *stress*, irritabilidade, esgotamento psíquico e fisiológico (desde a fadiga até ao trauma). Como o som é um fator de incomodidade e de desconforto, dá origem ao que se pode chamar por poluição sonora. Esta é a única forma de poluição que além de causar efeitos fisiológicos nocivos no homem lhe causa também efeitos psicológicos nefastos. O ruído deixou de ser apenas um incómodo para ser causa de algumas patologias [ALMEIDA e SILVA, 2009].

Fazendo-se o condicionamento acústico de um espaço fechado, como um anfiteatro, pretende-se estudar as características essenciais do campo sonoro gerado no seu interior e identificar os princípios que possibilitem a realização de uma correção acústica. Esta correção acústica tem como objetivos, o aperfeiçoamento das qualidades de audição de

um espaço fechado, pretende garantir uma correta distribuição do som por todo o espaço, pretende evitar o mascaramento do som útil, impedindo os ruídos de fundo elevados, apropriar a reverberação do espaço para o uso a que se destina, evitar os defeitos acústicos como os ecos, ecos flutuantes, sombras sonoras e concentrações de sons [BASTOS, 2010].

Na acústica de salas existe uma fonte sonora ativa, e as ondas sonoras que se criam podem chegar até ao recetor via direta ou refletida, como se pode observar na Figura 16 [TECNIWOOD, 2013].

As ondas sonoras diretas dirigem-se em linha reta desde a fonte sonora até ao recetor enquanto os sons refletidos, assim como o nome indica, só após reflexões em superfícies existentes na sala, que podem ser únicas ou múltiplas, é que atingem o recetor. A onda que chega primeiro é a mais intensa, e esta chama-se onda direta. Esta é acompanhada de um seguimento de ondas refletidas que vão chegando ao ouvido do recetor dando assim origem ao campo reverberado. À medida que estas vão chegando vão ficando mais fracas devido às absorções consecutivas que sofrem em cada reflexão nas superfícies existentes e também pelo efeito da absorção [TECNIWOOD, 2013].

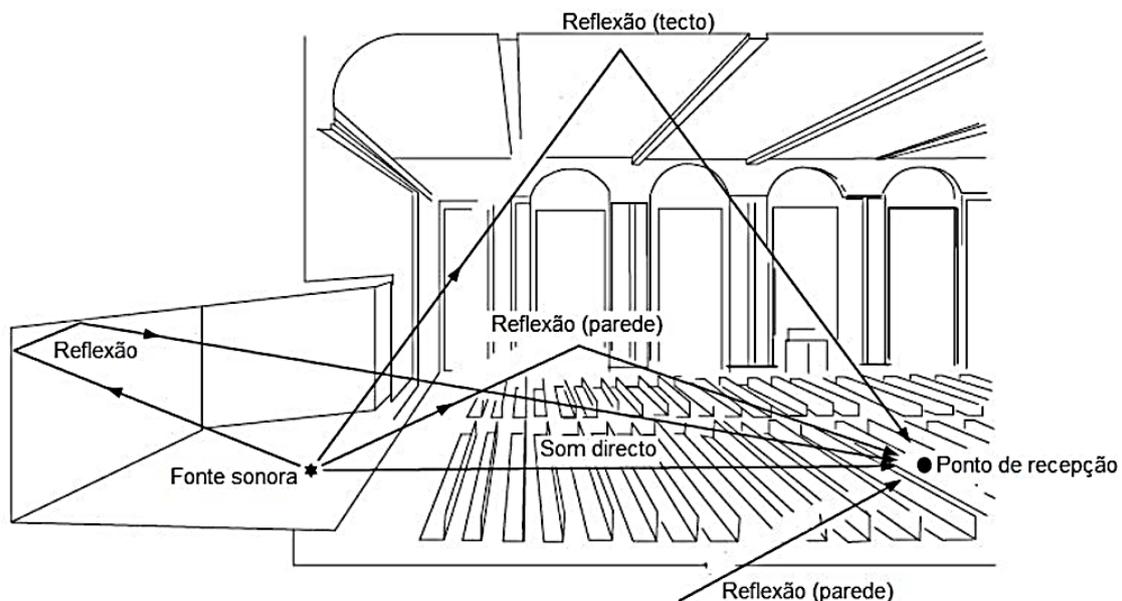


Figura 16 – Som direto e indireto (refletido) [BASTOS, 2010].

Para equilibrar o campo sonoro num espaço fechado, interessa conhecer a geometria da sala, a utilização e o posicionamento correto dos diferentes tipos de superfícies. É a relação entre o som direto e reverberado, em termos de amplitude e em termos de atraso temporal, que qualifica acusticamente as salas [TECNIWOOD, 2013].

Por outras palavras, as qualidades acústicas de um espaço fechado de uma sala para a palavra dependem da forma do recinto, da correta difusão do som, do volume e do tipo de superfícies (refletoras ou absorventes) que o constituem [BASTOS, 2010].

### 2.3. Conforto acústico

Só existe conforto acústico, segundo Vianna e Ramos (2005), quando há um mínimo de esforço fisiológico relativamente ao som, à luz, ao calor e à ventilação para a concretização de uma tarefa. Quando estas necessidades são consideradas obtém-se assim um ambiente confortável que proporciona bem-estar e harmonia [CATAI, 2006; VIANNA e RAMOS, 2005].

Para o conforto acústico temos que considerar e analisar as seguintes variáveis [CATAI, 2006]:

- Tráfego;
- Arquitetura;
- Clima (ventilação, pluviosidade);
- Orientação ou implantação.

Num anfiteatro, onde existam aulas, a palavra é um bem essencial e por isso um bom desempenho acústico tem que ser assegurado. É neste espaço que os conhecimentos são transmitidos dos professores para os alunos pela comunicação verbal.

A sala de aula é um local que exige níveis de concentração por parte dos alunos e dos professores e esta concentração pode ser influenciada pela qualidade acústica da sala, ou seja, pelas más condições ambientais e/ou deficientes condições do espaço.

Os projetistas das salas de aulas devem estudá-la para que exista um ambiente acusticamente confortável tanto para os oradores como para os recetores do som.

No entanto, não existem soluções matemáticas ou arquitetónicas exatas para que se consiga edificar um espaço como um anfiteatro ou uma sala de aula, com propriedades acústicas ótimas. Existem sim várias características subjetivas que possibilitam a avaliação da qualidade acústica de um espaço fechado, no caso em estudo a reverberação, e estas características têm sido correlacionadas com vários parâmetros físicos calculáveis que dependem das características do espaço [PEREIRA, 2010].

## 2.4. Aplicação das normas

O Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) aprovado pelo Decreto-Lei nº 96/2008 de 9 de Junho regulariza a vertente do conforto acústico no âmbito do regime da edificação, colaborando para a melhoria da qualidade do ambiente acústico e para o bem-estar e saúde das populações, em articulação com o regime jurídico relativo ao ruído ambiente.

Neste regulamento, para o caso em estudo do Tempo de Reverberação, é feito um aditamento ao Decreto-Lei nº 129/2002, de 11 de maio, o artigo 10.º-A sobre Auditórios e Salas que cita que recintos que sejam para atividades oratórias como auditórios, salas de conferência, salas polivalentes e salas de cinema estão sujeitos a vários requisitos como Tempo de Reverberação ( $T_r$ ), Nível Sonoro Contínuo Equivalente do Ruído ( $L_{Aeq}$ ), Isolamento Sonoro Padronizado ( $D_{nT,w}$ ) e o Isolamento Sonoro Padronizado correspondente à banda de oitava centrada na Frequência de 63Hz ( $D_{nT,oit.63Hz}$ ) [RRAE, 2008].

Para este trabalho apenas foi utilizado o Tempo de Reverberação que é referido na alínea a) e b) do ponto 1.

O ponto a) do presente regulamento diz que o tempo de reverberação médio,  $T$ , nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz, a considerar para estas salas quando estão desocupadas e mobiladas, deverá satisfazer o estabelecido pelas Equações 4, 5 e 6:

$$\bullet \quad T \leq 0,12 * V^{\frac{1}{3}}, \text{ se } V < 250 \text{ m}^3 ; \quad (4)$$

$$\bullet \quad T \leq 0,32 + 0,17 * \text{Log}V, \text{ se } 250 \leq V < 9000 \text{ m}^3; \quad (5)$$

$$\bullet \quad T \leq 0,05 * V^{\frac{1}{3}}, \text{ se } V \geq 9000 \text{ m}^3 \quad (6)$$

Sendo  $V$  o volume interior da sala ( $\text{m}^3$ ).

Também é referido, no ponto b) deste regulamento, que o projeto de condicionalismo acústico destas salas deve incluir um estudo específico para que sejam asseguradas as características de reverberação adequadas no restante espectro de frequências e uma boa inteligibilidade da palavra em todos os pontos das salas.

## 2.5. Materiais e Sistemas de Absorção

Quando uma onda sonora alcança uma superfície, uma parte dessa energia é transmitida ao espaço adjacente, uma parte da energia é refletida pela superfície e outra parte é dissipada nessa superfície. A isto se chama absorção sonora. Considerando que a superfície não faz transmissão de energia, a energia sonora dissipada corresponde à diferença entre as energias sonoras das ondas incidentes e das ondas refletidas. Esta absorção depende das características das superfícies e das propriedades mecânicas dos materiais e também do ângulo de incidência do som e da sua frequência [TECNIWOOD, 2013].

Considere-se por exemplo uma fonte sonora que emite energia num espaço fechado. A onda sonora que é produzida propaga-se até atingir uma superfície e parte da energia sonora é transmitida de acordo com as características do isolamento sonoro da superfície em que bateu. A restante energia, uma parte é refletida e outra é absorvida pela superfície [ALMEIDA E SILVA, 2009].

As características de um material para o interior e para o exterior de um edifício são diferentes pois têm exigências (neste caso acústicas) diferentes. As características de um anfiteatro, como a sua geometria, a característica dos materiais envolventes e das superfícies e o volume do anfiteatro, influenciam a qualidade e o nível do som [BRAGA, 2009].

Uma boa combinação de materiais absorventes, refletores e difusores num anfiteatro conduz a uma boa correção acústica, quando estes são aplicados de forma adequada.

Na Figura 17 mostra-se como é que uma onda acústica se comporta ao se deparar com superfícies com características diferentes.

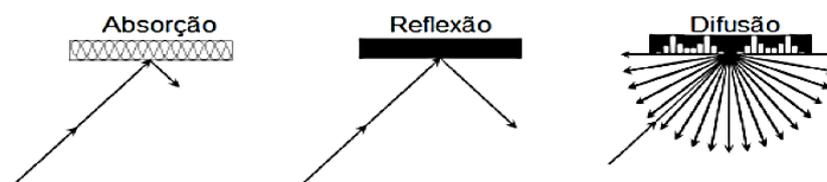


Figura 17 – Encontro de uma onda acústica com superfícies com características diferentes [BASTOS, 2010].

### **2.5.1. Tipos de materiais e sistemas de absorção**

A absorção nas superfícies interiores tem um processo físico ligado à absorção sonora das superfícies de uma sala que é função das características acústicas e “vibracionais” de cada superfície em estudo, da frequência e das dimensões da sala. Os mecanismos de absorção podem ser de acoplamento modal se a onda incidente tiver uma frequência parecida à frequência natural do sistema este entra em movimento e, absorve e dissipa a energia das ondas sonoras incidentes; também podem ser de reação local, estes dependem inteiramente das propriedades da superfície nos pontos de incidência da energia sonora [PEREIRA, 2010].

Os materiais e sistemas de absorção podem ser agrupados, em função das suas características básicas, em três categorias [BASTOS, 2010 e TECNIWOOD, 2013]:

- Porosos (absorvem a energia sonora nas altas frequências);
- Ressonadores de cavidade (absorvem nas frequências médias) e Membranas ressonantes (que absorvem energia sonora nas baixas frequências);
- Superfícies difusoras (que dispersam o som pelo espaço podendo eliminar ecos sem causar perdas de energia sonora).

Numa sala, também é necessário considerar que o mobiliário e a assistência que também têm um contributo importante na área de absorção sonora total do espaço.

Além disso outros fatores a ter em conta é a estética, o custo do material e mão-de-obra, a manutenção, segurança contra incêndios e impermeabilizações, adaptação a sistemas de energia elétrica, aquecimento e refrigeração, entre outro [BASTOS, 2010].

### **2.5.2. Materiais porosos**

Os materiais porosos possuem aberturas/orifícios que devem estar ligadas entre si. O movimento do ar, devido às variações de pressão, propaga-se nestes pequenos espaços ou orifícios, que como são de reduzidas dimensões e devido à viscosidade do ar, origina-se uma degradação em energia calorífica fazendo com que as ondas sonoras atenuem [BASTOS, 2010].

Os materiais porosos absorvem a energia nas altas frequências, de 1600Hz a 6400Hz, assegurando a sua permeabilidade e propagação [BASTOS, 2010].

Os materiais porosos também absorvem sons nas frequências baixas mas neste caso a absorção aumenta com a espessura, enquanto nas altas, este fator não influencia a absorção [BASTOS, 2010].

Estes materiais têm um bom desempenho de absorção sonora a nível de resistividade do ar. Se a estrutura for demasiado densa o ar terá dificuldade em penetrar para o seu interior e assim a absorção sonora será reduzida o que se aconselha a uma estrutura não muito densa [ALMEIDA e SILVA, 2009].

Alguns exemplos de materiais porosos são os reposteiros, tecidos e alcatifas, massas porosas com fibras minerais ou granulados minerais, placas de lã de madeira, lã de rocha, lã de vidro, massas porosas para projeção, aglomerados de cortiça e alguns plásticos expandidos à base de poliuretano de poliestireno, entre outros como mostra a Figura 18. É necessário ter em atenção que uma eventual pintura ou envernizamento dos materiais pode prejudicar a absorção sonora dos materiais [ALMEIDA e SILVA, 2009; BASTOS, 2010].

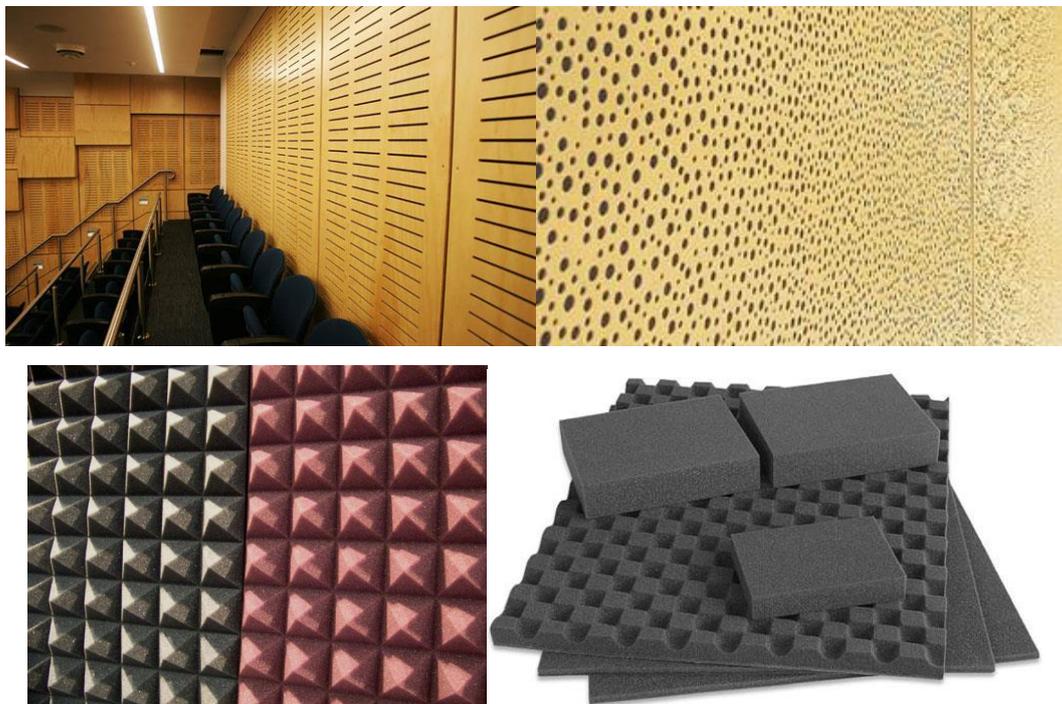


Figura 18 – Materiais Porosos – Aglomerados de madeira e Espumas [engenhariacivil.com].

### 2.5.3. Sistemas ressonantes

Os sistemas ressonantes dissipam a energia por absorção mecânica e podem dividir-se em dois tipos:

- Os painéis ressonantes, que são mais eficazes na correção de espaços nas baixas frequências, de 100Hz a 400Hz, [BASTOS, 2010].

Este sistema é constituído por um painel de pequena espessura, flexível, apoiado numa estrutura intermédia que está fixada num elemento rígido e que contem um espaço de ar no tardo (por exemplo uma placa de gesso cartonado fixada numa parede) como mostra a Figura 19 [ALMEIDA e SILVA, 2009].

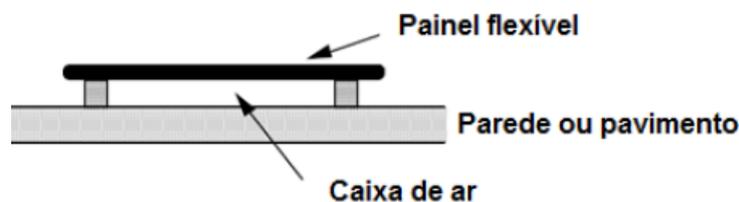


Figura 19 – Painel ressonante [BASTOS, 2010].

A energia é dissipada através o movimento do painel. Quando o som incide sobre o painel este vibra e dissipa assim parte da energia que se transforma em energia cinética.

Esta solução é muito seletiva em termos das frequências com elevada eficácia de absorção sonora o que é uma grande desvantagem. Uma possível solução para esta desvantagem é a introdução de um material poroso na caixa-de-ar, para se obter assim uma zona com bom desempenho de absorção sonora [ALMEIDA e SILVA, 2009].

Os painéis ressonantes mais utilizados os painéis de madeira ou gesso cartonado aplicados como revestimento de tetos e/ou paredes (Figura 20).



Figura 20 – Membrana ressonante [lemovacustica.com].

- Os ressoadores de Helmholtz são aplicados na correção acústica em bandas de frequência médias, de 400Hz a 1600Hz.

Este sistema é constituído por uma cavidade de ar confinado ligado ao ambiente através de uma abertura estreita, Figura 21.

Em edifícios correntes, quando se utiliza este tipo de sistema, não se utiliza um elemento único mas um conjunto de ressoadores agrupados, como por exemplo os tetos falsos perfurados, que normalmente são em madeira, gesso cartonado ou metálicos. As aberturas destes ressoadores são normalmente circulares.

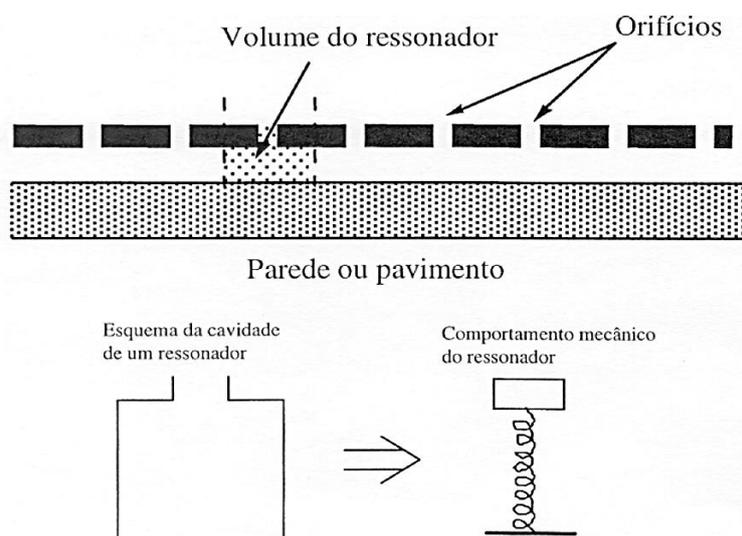


Figura 21 – Ressonador de Helmholtz [REIS e MOREIRA, 2009].

O problema com estes dois ressoadores, *Helmholtz* e painéis ressonantes, é que ambos são muito seletivos, ou seja, são dimensionados para uma determinada frequência de ressonância específica. Para ultrapassar este problema é necessário aumentar a eficácia destes ressoadores para uma gama maior de frequências e é usual conjugar sistemas porosos e ressoadores tendo em conta os processos de dissipação envolvidos em cada um [BASTOS, 2010].

#### 2.5.4. Difusores

As superfícies difusoras, como os exemplos apresentados na Figura 22, são utilizadas para corrigir ecos em salas quando a energia sonora tem de ser conservada.

A sua colocação ainda não é, em muitos casos consensual, no que diz respeito à sua localização na sala, embora se saiba que, superfícies difusoras colocadas na parte de trás de um anfiteatro, são melhores para evitar ecos do que a colocação de uma superfície absorvente. Em auditórios e salas de aulas com tetos difusores existe um aumento da uniformidade do nível sonoro por toda a sala sem pôr em causa a inteligibilidade. Nos casos dos auditórios não só facilita a comunicação entre professor e estudantes mas também a conversação entre os próprios estudantes entre os estudantes e o professor [BASTOS, 2010].



Figura 22 – Difusores acústicos [lemovacustica.com].



***Capítulo 3***



### **3. Metodologia**

Neste capítulo explica-se a metodologia adotada ao longo deste trabalho.

Este estudo foi realizado com o propósito de medir o Tempo de Reverberação dos anfiteatros das Escolas do Campus de Azurém, para se ter uma percepção da qualidade acústica para a audição da palavra dos anfiteatros, durante as aulas ou palestras.

Ao longo deste capítulo serão apresentados os procedimentos metodológicos utilizados neste estudo e serão apresentados os anfiteatros, a metodologia de Sabine, os equipamentos e o *software* utilizado para o estudo dos anfiteatros.

#### **3.1. Caracterização dos anfiteatros em estudo**

Os quatro anfiteatros estudados fazem parte das instalações da Universidade do Minho e estão situados no Campus de Azurém. Estes anfiteatros foram escolhidos de modo a caracterizar os anfiteatros das diferentes escolas. Foi assim escolhido um anfiteatro de cada escola deste Campus da Universidade. Os anfiteatros, dentro da mesma escola, têm dimensões e características semelhantes.

Os anfiteatros estudados foram o anfiteatro do Edifício B, Fase I da Escola de Engenharia, B1.12, da Escola de Engenharia, EE0.19, da Escola de Ciências, EC1.03 e o da Escola de Arquitetura, EA2.05 (Figura 23).



Figura 23 – Vista do Campus com indicação aproximada dos Anfiteatros [Google Maps].

### 3.1.1. Anfiteatro do Edifício B – B1.12

O anfiteatro B1.12 é um anfiteatro de geometria quadrada (Figura 24), com as dimensões de 12,15x11,6 m, e um pé direito médio de 3 m.

Tem um *hall* de entrada e na parede de fundo tem uma zona técnica fechada de forma retangular e um corredor de acesso à saída de emergência. Essa zona técnica não será alvo de estudo para esta dissertação.

O pavimento, e quase a totalidade das suas paredes, são revestidos a cortiça. O teto é de gesso cartonado e a parede frontal possui dois quadros de plástico. A porta principal é de madeira e a porta da zona técnica e da saída de emergência são de ferro.

Este anfiteatro tem 11 filas de 11 cadeiras estofadas cada e as suas mesas são de madeira.

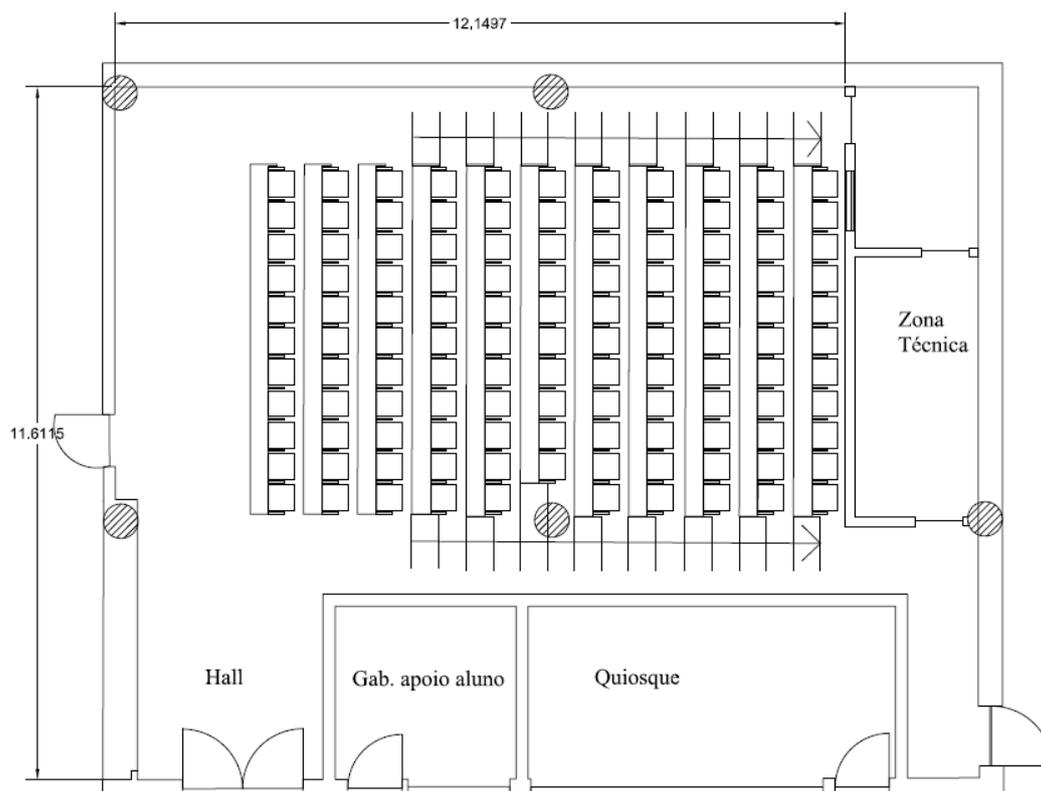


Figura 24 – Planta B1.12.

Na Figura 25 apresentam-se vistas gerais do anfiteatro e dos seus pormenores construtivos.



Figura 25 – Vista geral do Anfiteatro B1.12 e dos materiais de revestimento e mobiliário que o constituem.

### 3.1.2. Anfiteatro da Escola de Ciências – EC1.03

Este anfiteatro possui geometria retangular (15,6x8 m), como mostra a planta da Figura 26.

As paredes são revestidas a madeira, até 2 m de altura e o teto é de gesso cartonado. O pavimento é revestido a madeira.

Este anfiteatro é composto por 13 filas de 10 cadeiras cada, todas de madeira, e as mesas também são de madeira. Na parede de fundo existe um quadro.

O anfiteatro tem 5,5 m de pé direito no local onde se posiciona o orador, enquanto no extremo oposto da sala tem aproximadamente 2,8 m.

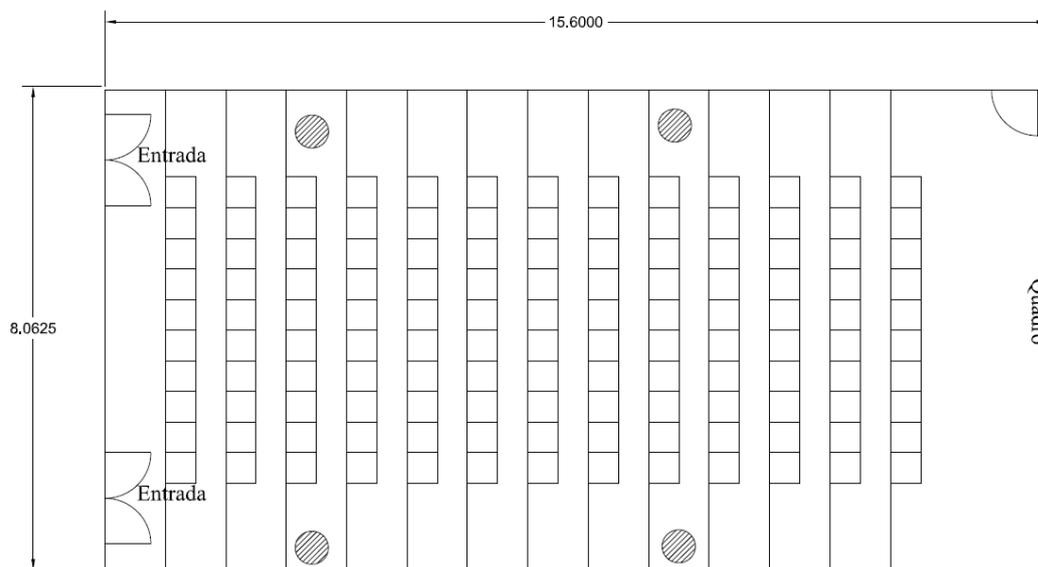


Figura 26 – Planta EC1.03.

Na Figura 27 apresentam-se vistas gerais do anfiteatro e dos seus pormenores construtivos.



Figura 27 – Vista geral do Anfiteatro EC1.03 e dos materiais de revestimento e mobiliário que o constituem.

### 3.1.3. Anfiteatro da Escola de Engenharia – EE0.19

O anfiteatro EE0.19 é de geometria retangular, 9,24x14,1 m, (Figura 28). Este anfiteatro é mais largo e menos alto que o EC1.03.

É composto por 10 filas de 13 cadeiras cada, e mesas todas de madeira.

As paredes, frontal e de fundo, são de reboco liso, e as laterais são revestidas a madeira, com alturas variáveis. O pavimento é linóleo e o teto é de gesso cartonado. Este anfiteatro tem umas escadas na sua parede de fundo que direcionam até à saída de emergência. Tem também envidraçados na parte superior de uma das paredes laterais, que proporcionam luminosidade, ao anfiteatro. Na parede frontal, encontra-se um quadro de plástico.

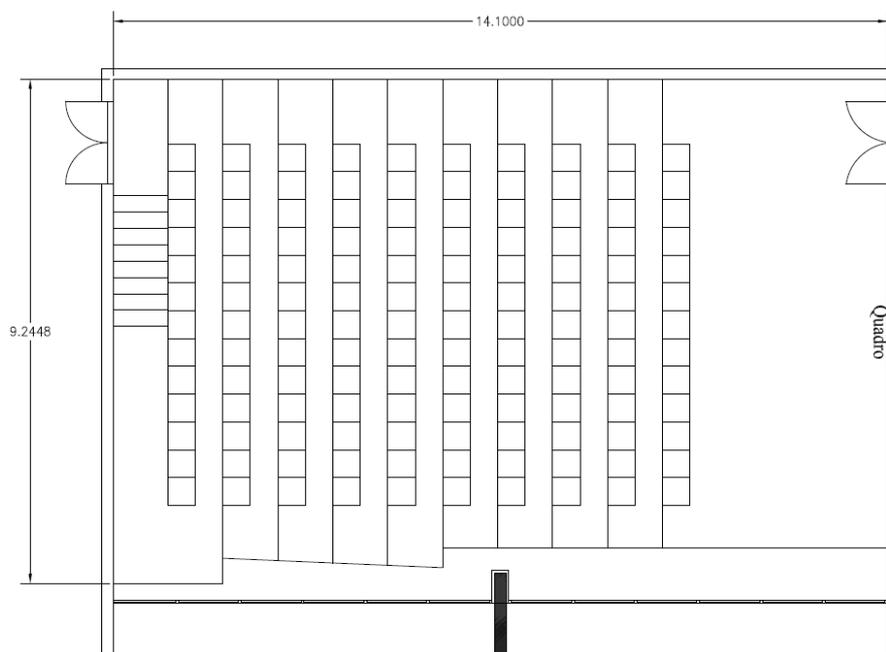


Figura 28 – Planta EE0.19.

Na Figura 29 apresentam-se vistas gerais do anfiteatro e dos seus pormenores construtivos.



Figura 29 – Vista geral do Anfiteatro EE0.19 e dos materiais de revestimentos e mobiliário que o constituem.

### 3.1.4. Anfiteatro da Escola de Arquitetura – EA2.05

O anfiteatro EA2.05 tem uma geometria rectangular (7,25x14,98 m), como se mostra a planta da Figura 30. Este anfiteatro possui inclinação acentuada, tem 8 filas de 10 cadeiras cada, e mesas em madeira. O pavimento e as paredes, até 1 m de altura, também são revestidos a madeira. Tem um *hall* de entrada em forma rectangular no início da sala, com portas também em madeira. O local onde o professor leciona é um

palco, ou seja, é ligeiramente elevado, cerca de 1 m acima do primeiro patamar. Tem 2 quadros de plástico a ocupar a parede de fundo, e o teto é em gesso cartonado. Este anfiteatro tem, na parte mais baixa, 2,5 m de pé direito e na parte mais alta 5,85 m de pé direito.

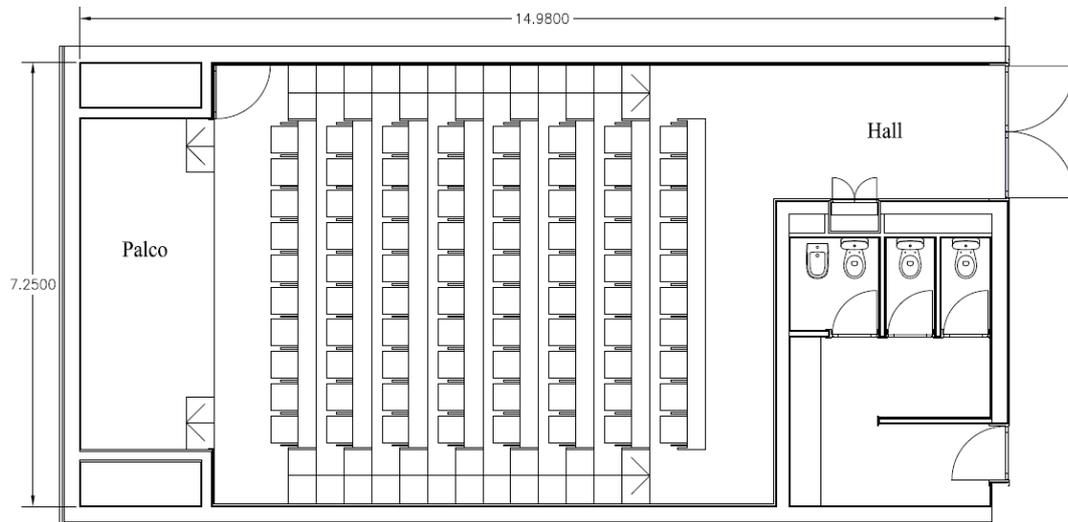


Figura 30 – Planta EA2.05.

Na Figura 31 apresentam-se vistas gerais do anfiteatro e dos seus pormenores construtivos.



Figura 31 – Vista geral do Anfiteatro EA2.05 e dos materiais de revestimentos e mobiliário que o constituem.

Nas Tabelas 2 e 3 apresenta-se um resumo das características geométricas e dos elementos constituintes de cada anfiteatro.

Tabela 2 – Características quantitativas dos anfiteatros.

Características	B1.12	EC1.03	EE0.19	EA2.05
Volume (m <sup>3</sup> )	400,1	534,4	419,9	329,5
Área em planta (m <sup>2</sup> )	118,8	124,7	123,6	84,4
Número médio de lugares	121	130	130	80
Comprimento máximo (m)	12	15,3	14	11,2
Largura máxima (m)	6,45	7,95	9,35	7,25
Pé direito médio (m)	2,6	4,3	3,5	4,2

Tabela 3 – Características dos materiais dos anfiteatros.

Elemento	B1.12	EC1.03	EE0.19	EA2.05
Pavimento	Cortiça	Madeira	Linóleo	Madeira
Teto	Gesso Cartonado	Gesso Cartonado	Gesso Cartonado	Gesso Cartonado
Paredes	Cortiça	Até 2m de altura madeira, restante até ao teto reboco	Laterais em madeira, frontal e traseira em reboco	Até 1m de altura em madeira, restante até ao teto em reboco
Cadeiras	Estofadas em tecido	Madeira	Madeira	Madeira
Mesas	Madeira	Madeira	Madeira	Madeira
Portas	Madeira e Metal	Madeira	Madeira	Madeira
Envidraçados	Sim	Sim	Sim	Não

### 3.2. Medições acústicas nos anfiteatros - Equipamentos

Para a realização deste trabalho foi necessária a utilização de equipamentos de medição do tempo de reverberação nos anfiteatros para assim se puder obter um conhecimento mais específico dos anfiteatros em termos acústicos.

#### 3.2.1. Descrição dos Equipamentos

Para a realização da medição do tempo de reverberação, necessária ao desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados os seguintes equipamentos (Figura 32):

- Sonómetro CEL, modelo 573.C1, classe de exatidão 1, nº de série 3/1011913;
- Calibrador acústico, modelo CEL-284/2, nº de série 4/06124406;
- Microfone e pré-amplificador, modelo CEL 250, nº de série 4105;
- Gerador de ruído, modelo CEL 513, nº de série 074270;
- Fonte sonora, modelo B&K 4224, nº de série 1776816;
- Cabo de ligação gerador de ruído / fonte sonora referência C6658/20-01;
- Cabo de ligação sonómetro / gerador de ruído referência C6660/5;
- Tripé.



Figura 32 – Equipamentos – Sonómetro, Microfone e pré-amplificador, Fonte sonora, Calibrador acústico e Gerador de Ruído.

### 3.3. Descrição das medições do tempo de reverberação nos anfiteatros

Antes de se realizarem as medições, é necessário montar todo o equipamento. Começou-se então por montar o tripé, de seguida colocou-se o microfone no pré-amplificador e montou-se o sonómetro no tripé ajustando-se a altura do microfone a  $1,2 \text{ m} \leq h \leq 1,5 \text{ m}$ , ( $h$  é a altura do pavimento ao microfone), de seguida ligaram-se os cabos do gerador de ruído à fonte sonora ao sonómetro. O microfone deve situar-se a pelo menos 1 m das paredes ou de superfícies refletoras, a 1,5 m das janelas e portas e entre 1,2 m a 1,5 m acima do pavimento, como já foi referido anteriormente [DEC/LFTC/P03, 2010].

Liga-se o sonómetro e faz-se a configuração do mesmo para as medições nas bandas de frequência pretendidas.

No início e no fim das medições tem que se fazer a verificação do correto funcionamento do sonómetro e para isso realiza-se a sua calibração.

Nas opções do sonómetro seleciona-se a opção de calibrar, encaixa-se o calibrador no microfone e liga-se o mesmo, como se verifica na Figura 33. Regista-se o valor obtido que deve ser de 114dB. Caso não seja esse o valor obtido deve-se calibrar [DEC/LFTC/P03, 2010].



Figura 33 – Calibração do sonómetro.

Em seguida faz-se a configuração da medição na opção “*setup*”. Se já tiver uma configuração pré-existente escolhe-se a mesma, caso contrário faz-se uma nova [DEC/LFTC/P03, 2010].

Os dados para uma configuração típica são: Malha de ponderação: *LIN*; *Q=3*; *FAST*; *NUMBER OF RT: 6*; *METHOD: LEAST SQUARE*; *PROFILE GRAPH: ENABLED*; *START DELAY: 5 SECONDR*; *REPEAT MODE: MANUA* [DEC/LFTC/P03, 2010].

Depois da configuração feita falta preparar a fonte sonora, sem esquecer de colocar o difusor cónico e preparar o gerador de ruído, tendo em atenção os indicadores luminosos de “*overload*” e “*upper 3dB*” (se estes se ligarem, deve-se diminuir o nível do gerador de ruído) [DEC/LFTC/P03, 2010].

Devem ser feitos, pelo menos três medições, correspondendo a três pontos distintos afastados entre si mais de 50cm. Neste trabalho, devido ao tamanho dos anfiteatros foram feitos de 12 a 16 pontos em cada um dos anfiteatros.

Apresentam-se os pontos, em planta, que foram medidos em cada um dos anfiteatros em estudo no Capítulo 4.

De seguida fazem-se as medições, o registo dos resultados e por último o tratamento de dados.

### **3.4. Determinação dos Tempos de Reverberação de acordo com a Equação de Sabine**

O  $T_{60}$  foi calculado pela Equação de Sabine e comparado com os valores regulamentares ( $T_{\text{regulamentar}}$ ) para verificar se cumpre ou não o RRAE.

Para a utilização da Equação de Sabine (Equação 3) foram utilizados os coeficientes de absorção sonora do ar (Tabela 4) e dos materiais e dos objetos existentes nos anfiteatros em estudo (Tabela 5).

Tabela 4 – Coeficiente de Absorção Sonora do Ar [adaptado de ALMEIDA e SILVA, 2009].

Coeficientes de absorção sonora do ar ( $10^{-3}$ Neper/m)						
Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
10°C, de 30% a 50% de humidade	0,1	0,2	0,5	1,1	2,7	9,4
10°C, de 50% a 70% de humidade	0,1	0,2	0,5	0,8	1,8	5,9
10°C, de 70% a 90% de humidade	0,1	0,2	0,5	0,7	1,4	4,4
20°C, de 30% a 50% de humidade	0,1	0,3	0,6	1	1,9	5,8
<b>20°C, de 50% a 70% de humidade</b>	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>	<b>0,6</b>	<b>1</b>	<b>1,7</b>	<b>4,1</b>
20°C, de 70% a 90% de humidade	0,1	0,3	0,6	1,1	1,7	3,5

Tabela 5 – Coeficiente de Absorção Sonora dos Materiais e Objetos [adaptado de ALMEIDA e SILVA, 2009; BERANEK, 1996 e outros].

Coeficientes de absorção sonora dos materiais e objetos						
Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Argamassa	0,14	0,10	0,06	0,05	0,04	0,03
Gesso Cartonado, 2 placas (32mm)	0,28	0,12	0,10	0,17	0,13	0,09
Cortiça	0,22	0,22	0,70	0,70	0,84	0,84
Painéis de contraplacado fino	0,42	0,21	0,10	0,08	0,06	0,06
Blocos de betão com acabamento liso	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05
Vidro espesso	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Linóleo sobre betão	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Pavimento em Madeira	0,12	0,10	0,06	0,05	0,05	0,06
Cadeiras Vazias, Estofa médio	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
Cadeiras Vazias, Madeira	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16
Portas em Madeira	0,14	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
Quadro Plástico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02

### 3.5. Tratamento de dados do sonómetro para o Tempo de Reverberação

O cálculo dos tempos de reverberação em cada ponto de medição e os valores médios obtidos são automaticamente efetuados pelo *software* do sonómetro. O ficheiro de resultados apresenta estimativas dos tempos de reverberação apoiados em EDT (*Early Decay Time*),  $T_{20}$  e  $T_{30}$ .

Esse ficheiro apresenta também o número de resultados válidos para o cálculo de cada um dos valores médios dos tempos de reverberação.

O tratamento de dados consiste então em selecionar a melhor estimativa do tempo de reverberação para cada banda de terço de oitava preferindo tempos de reverberação estimados a partir de maiores decaimentos da pressão sonora, ou seja preferir  $T_{30}$  a  $T_{20}$  e

$T_{20}$  a EDT e preferir tempos de reverberação estimados a partir do maior número de resultados válidos.

Depois dos dados recolhidos e tratados vai-se avaliar a conformidade comparando os resultados obtidos com os valores regulamentares ( $T_{\text{regulamentar}}$ ) do RRAE.

### **3.6. Inquéritos**

Para avaliar a perceção dos professores e alunos em relação à qualidade acústica dos anfiteatros para a audição da palavra, foram elaborados inquéritos direcionados a cada grupo.

O objetivo destes inquéritos foi o de avaliar as opiniões relativamente ao ambiente acústico dos anfiteatros, de modo a identificar os fatores psicossociais que influenciam a sensação de conforto acústico nos seus ocupantes.

Sequencialmente os inquéritos foram analisados e recolhidas as informações dos 40 alunos e 2 professores em cada anfiteatro.

Os inquéritos dos alunos e professores foram ligeiramente diferentes, como se pode verificar no Anexo 1, pois existem pormenores diferentes entre os dois grupos que se devem ter em atenção.

As perguntas foram de respostas rápidas e simples para os dois grupos para que o inquérito não tomasse muito tempo da aula, excetuando a última pergunta que era de resposta aberta, podendo ou não ser respondida.

Os resultados destes inquéritos complementaram as medições do tempo de reverberação realizadas.

### **3.7. EASE *software***

O programa utilizado para a avaliação e caracterização acústica dos anfiteatros em estudo foi o *software* EASE.

Os espaços estudados destinam-se essencialmente à transmissão da palavra, ao ensino, e por isso é muito importante a perceção da palavra.

O EASE *software* realiza o cálculo de diversos parâmetros físicos como o Fator Força (G), Tempo e Reverberação ( $T_r$ ), Tempo de Decaimento (EDT), entre outros. O Tempo de Reverberação é o que apresenta maior destaque neste estudo devido à sua importância na transmissão da palavra e é por isso que vai ser este o que vai ser estudado com maior pormenor.

Estas duas medições serão comparadas depois da simulação no *software*.

Para a elaboração dos modelos de cada um dos anfiteatros, foi necessário introduzir no EASE algumas configurações como a geometria do anfiteatro, o tipo de fonte sonora, os recetores e os coeficientes de absorção sonora dos materiais que se encontram no anfiteatro e que se apresentam na Tabela 5.

Antes de se iniciar a programação no EASE é necessário desenhar os anfiteatros, sendo o *software* SketchUp utilizado para este fim.

Nas Figuras 34 à 37, apresentam-se alguns *3D* dos quatro anfiteatros obtidos no SketchUp.



Figura 34 – Vista geral do Anfiteatro B1.12 desenhado no SketchUp.



Figura 35 – Vista geral do Anfiteatro EC1.03 desenhado no SketchUp.



Figura 36 – Vista geral do Anfiteatro EE0.19 desenhado no SketchUp.



Figura 37 – Vista geral do Anfiteatro EA2.05 desenhado no SketchUp.



***Capítulo 4***



## 4. Apresentação de Resultados e Discussão

### 4.1. Cálculo do limite regulamentar ( $T_{\text{regulamentar}}$ )

Para se efetuar uma comparação entre os valores de  $T_{60}$  medidos e  $T_{60}$  obtidos pela Equação de Sabine com os  $T_{\text{regulamentares}}$ , tem que se calcular o tempo de reverberação médio regulamentar para cada anfiteatro de acordo com o estabelecido no RRAE: - O tempo de reverberação médio,  $T$ , nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz, a considerar para estas salas quando estão desocupadas e mobiladas, deverá cumprir a Equação 5  $T \leq 0,32 + 0,17 * \text{Log}V$ , se  $250 \leq V < 9000$  [RRAE, 2008].

Os valores  $T_{\text{regulamentares}}$  são os apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 –  $T_{\text{r}}$  Regulamentar.

Anfiteatro	Volume ( $\text{m}^3$ )	Tregulamentar (s)
B1.12	400,1	0,76
EC1.03	534,4	0,78
EE0.19	419,9	0,77
EA0.19	329,5	0,75

### 4.2. Previsão do tempo de Reverberação usando a Equação de Sabine

A primeira fase do estudo realizado consistiu no calculo do  $T_{60}$  pela Equação de Sabine (Equação 3).

Os valores de  $T_{60}$  calculados são apresentados na Tabela 7 e nos gráficos das Figuras 38, 39, 40 e 41.

Tabela 7 –  $T_{60}$  calculado para cada anfiteatro por referência.

Frequência (Hz)	T60 Calculado (s)			
	B1.12	EA2.05	EC1.03	EE0.19
125	0,39	0,81	1,04	0,81
250	0,42	1,19	1,51	1,24
500	0,23	1,43	1,78	1,46
1000	0,22	1,22	1,51	1,21
2000	0,20	1,30	1,57	1,27
4000	0,21	1,23	1,44	1,20

Dos anfiteatros estudados apenas o anfiteatro B1.12 cumpre o estabelecido no Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) pela previsão do Tempo de Reverberação efetuada pela Equação de Sabine.

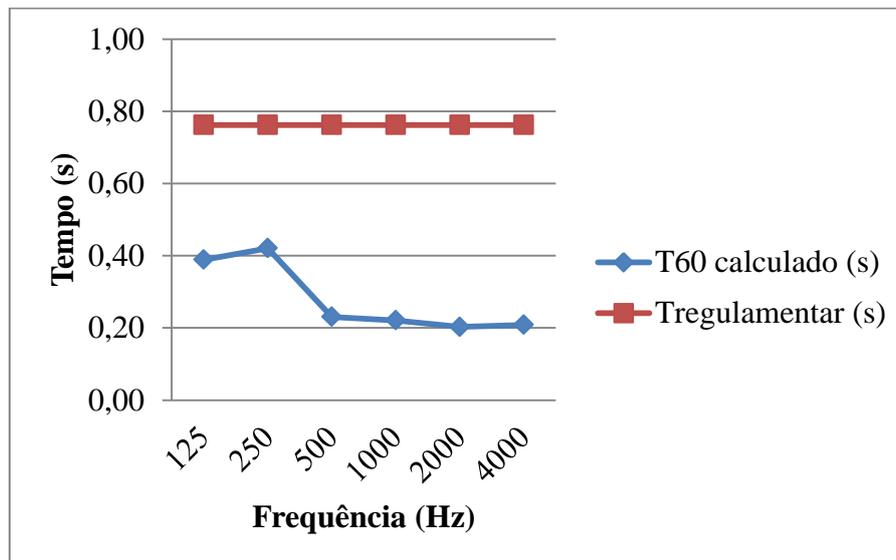


Figura 38 –  $T_{60}$  calculado e  $T_{regulamentar}$  no B1.12.

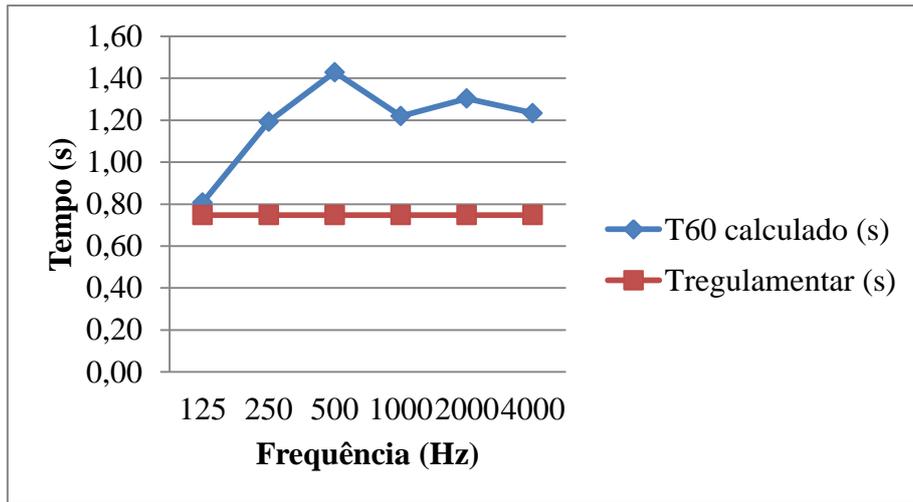


Figura 39 – T<sub>60</sub> calculado e T<sub>regulamentar</sub> no EA2.05.

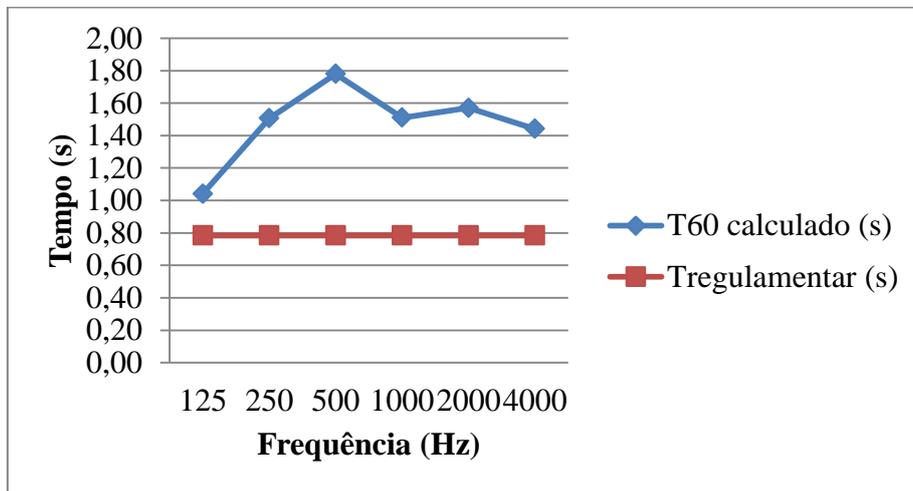


Figura 40 – T<sub>60</sub> calculado e T<sub>regulamentar</sub> no EC1.03.

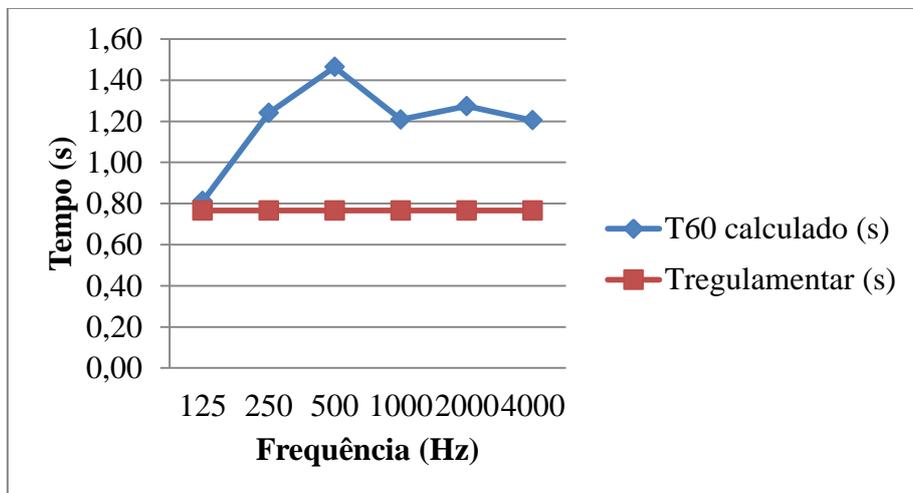


Figura 41 – T<sub>60</sub> calculado e T<sub>regulamentar</sub> no EE0.19.

Destes cálculos efetuados conclui-se que o anfiteatro com piores tempos de reverberação, pela previsão efetuada pela Equação de Sabine, é o anfiteatro da escola de ciências, o EC1.03, e o melhor deles é o anfiteatro B1.12. Nesta previsão o anfiteatro B1.12 cumpre o RRAE.

#### **4.2.1. Medição do Tempo de Reverberação**

Para se proceder à avaliação a qualidade da audição da palavra dos anfiteatros em estudo, foram efetuadas medições do tempo de reverberação em cada um dos anfiteatros.

Todas as medições foram feitas por frequência, em bandas de 1/3 de oitava.

Em cada anfiteatro foram definidos vários pontos para as medições, nestes pontos localizou-se o microfone. A fonte sonora foi localizada onde normalmente costuma estar o orador (docente), perto da parede frontal.

As medições foram efetuadas com os anfiteatros sem ocupação para além do operador, em tempo de férias escolares, e para cada ponto foram registadas 6 leituras.

Nas Figuras 42, 43, 44 e 45 apresentam-se os pontos medidos em cada um dos anfiteatros assim como os valores obtidos em cada uma das medições para cada um dos anfiteatros em gráfico do T60 medido.

No anfiteatro B1.12 efetuaram-se leituras em 12 pontos de medição (Figura 42). No anfiteatro EC1.03 efetuaram-se leituras em 15 pontos de medição (Figura 43). No anfiteatro EE0.19 efetuaram-se leituras em 16 pontos de medição. (Figura 44). No anfiteatro EA2.05 efetuaram-se leituras em 12 pontos de medição (Figura 45). Em todos os anfiteatros a fonte sonora (FS) localizou-se junto à parede frontal, para uma melhor perceção das ondas sonoras desde a posição do orador até aos recetores.

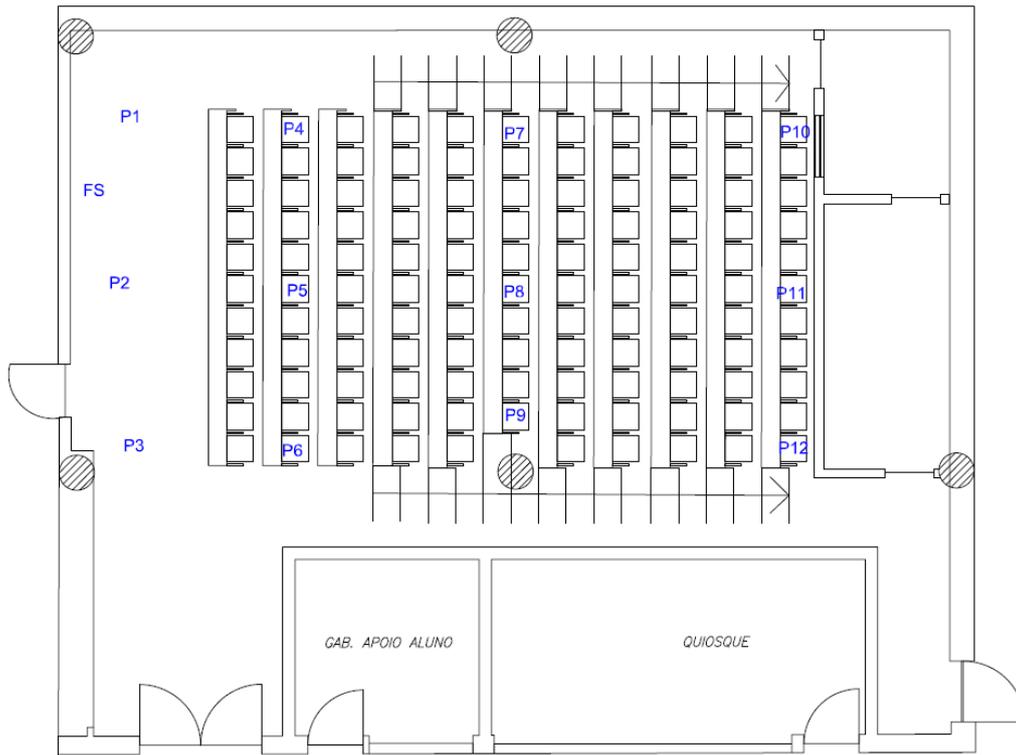


Figura 42 – B1.12 com pontos de medição.

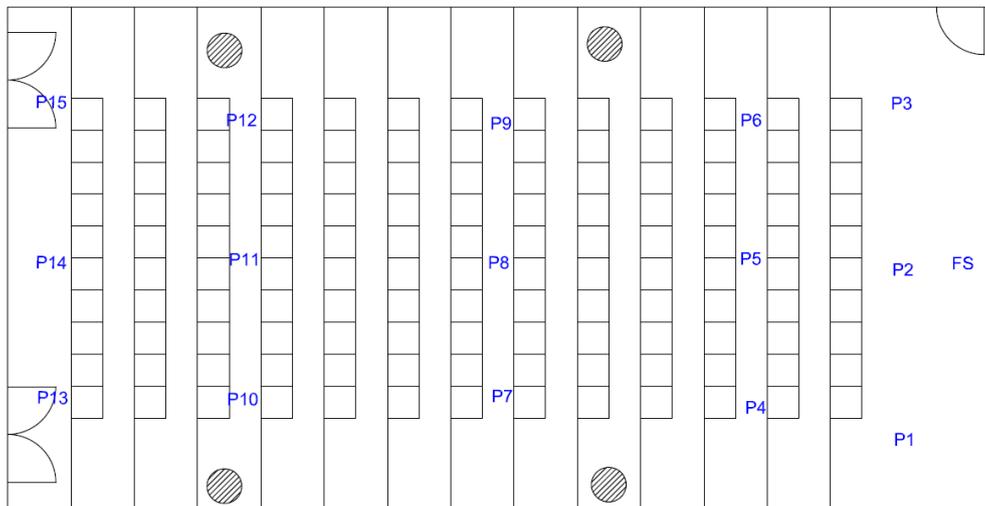


Figura 43 – EC1.03 com pontos de medição.

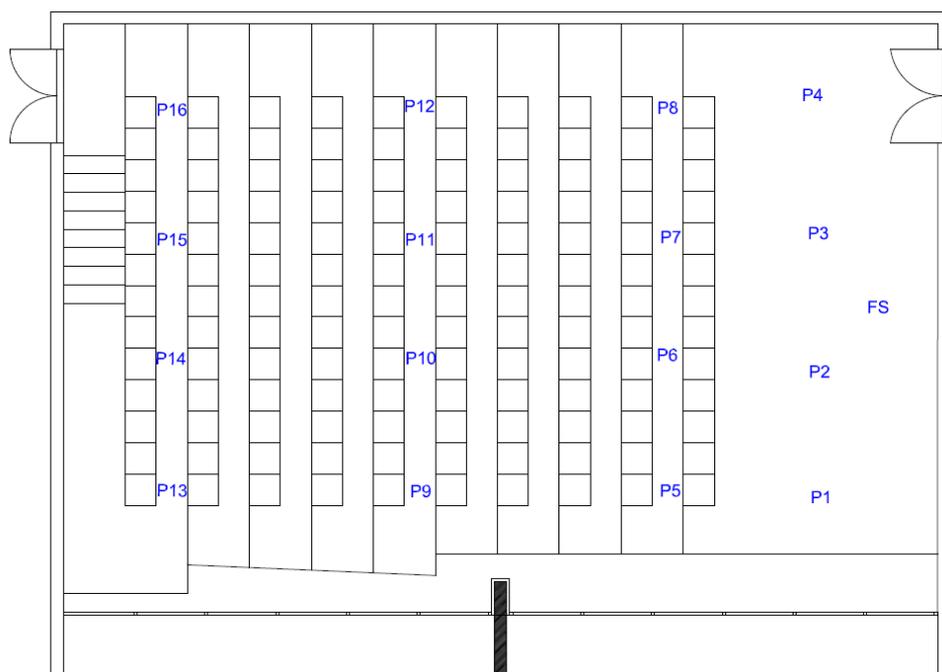


Figura 44 – EE0.19 com pontos de medição.

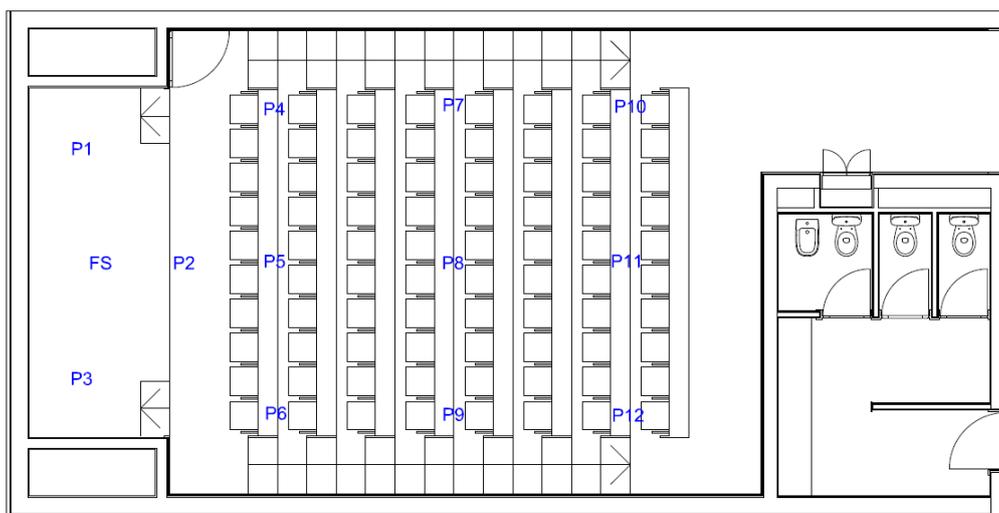


Figura 45 – EA2.05 com pontos de medição.

Nas Figuras de 46 a 49 apresentam-se os valores medidos em cada um dos pontos dos anfiteatros para as frequências centrais de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz que o regulamento (RRAE) indica e a vermelho apresenta-se o Tempo de Reverberação Regulamentar.

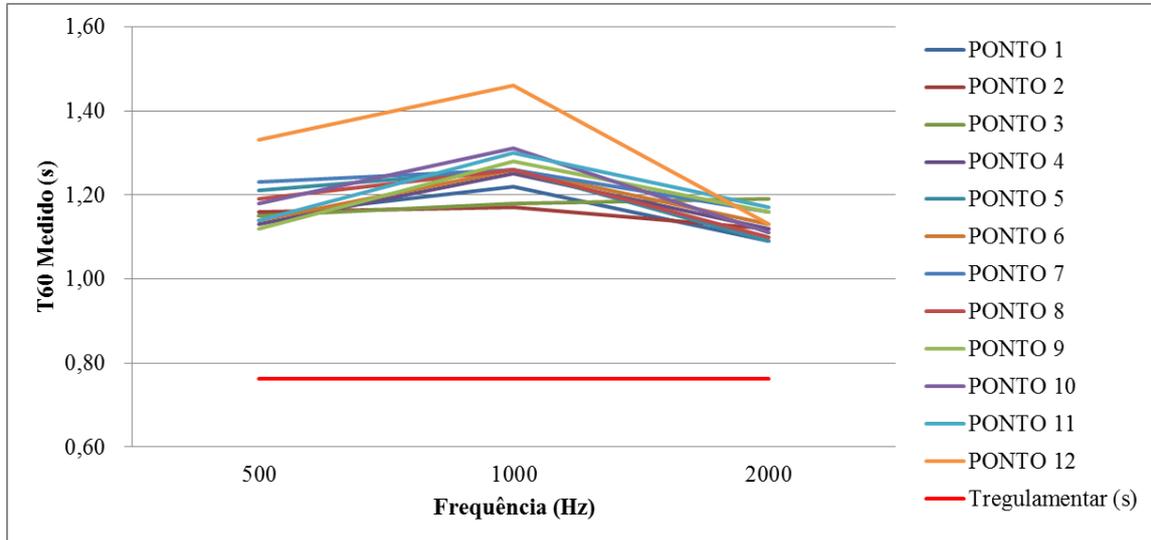


Figura 46 –  $T_{60}$  medido - Anfiteatro B1.12.

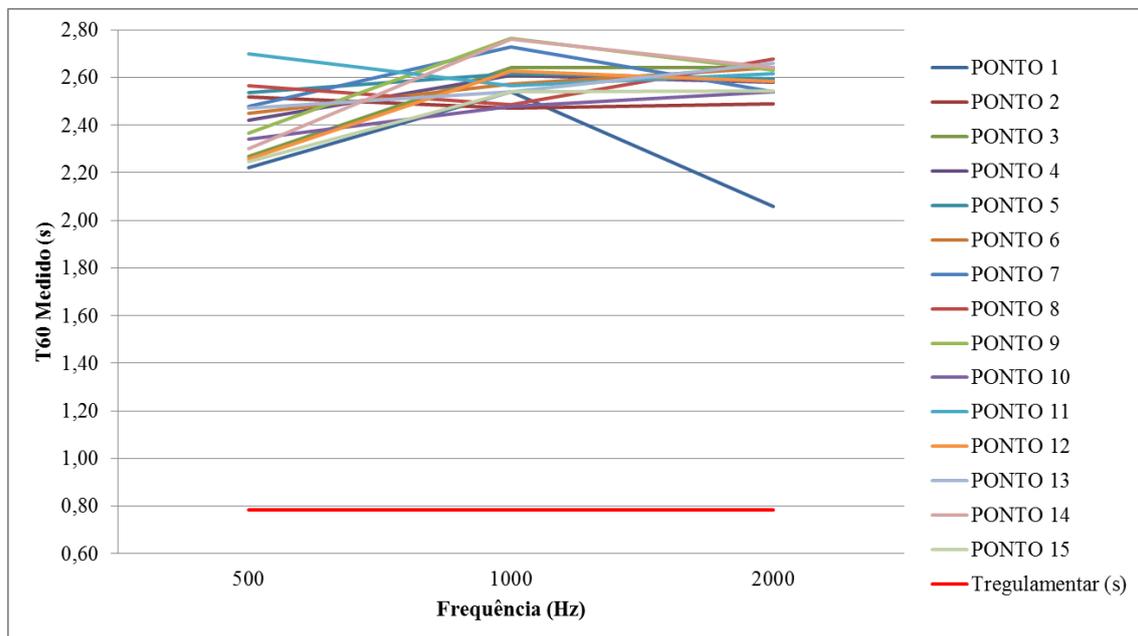


Figura 47 –  $T_{60}$  medido - Anfiteatro EC1.03.

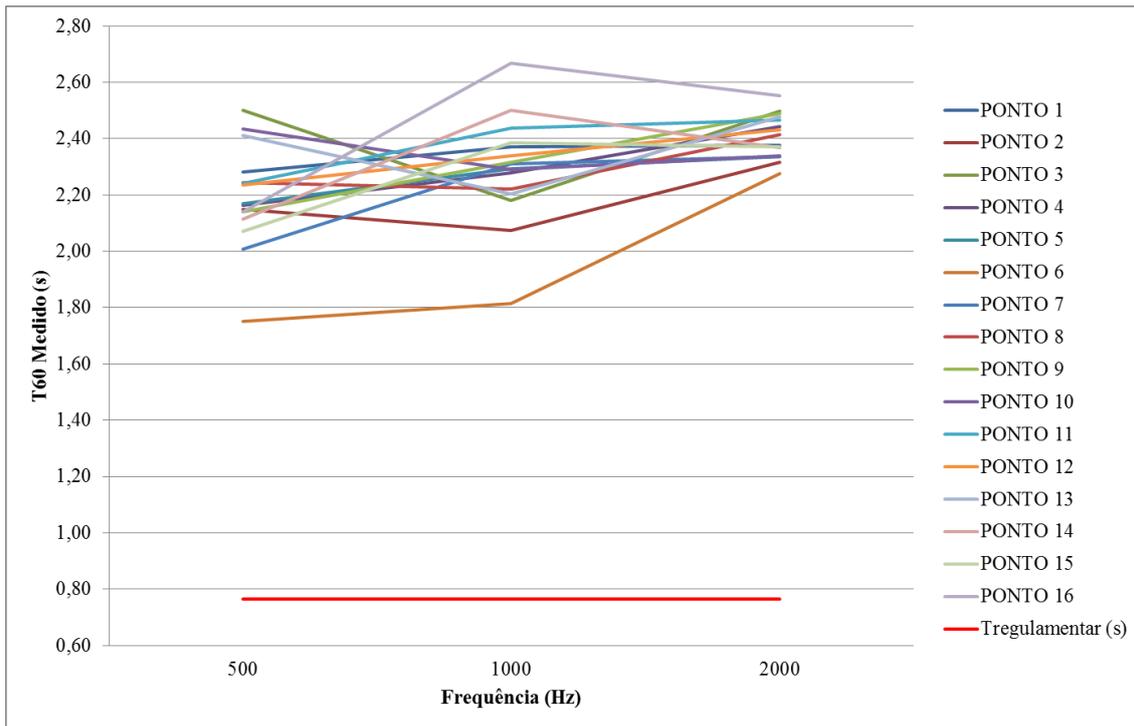


Figura 48 – T<sub>60</sub> medido - Anfiteatro EE0.19.

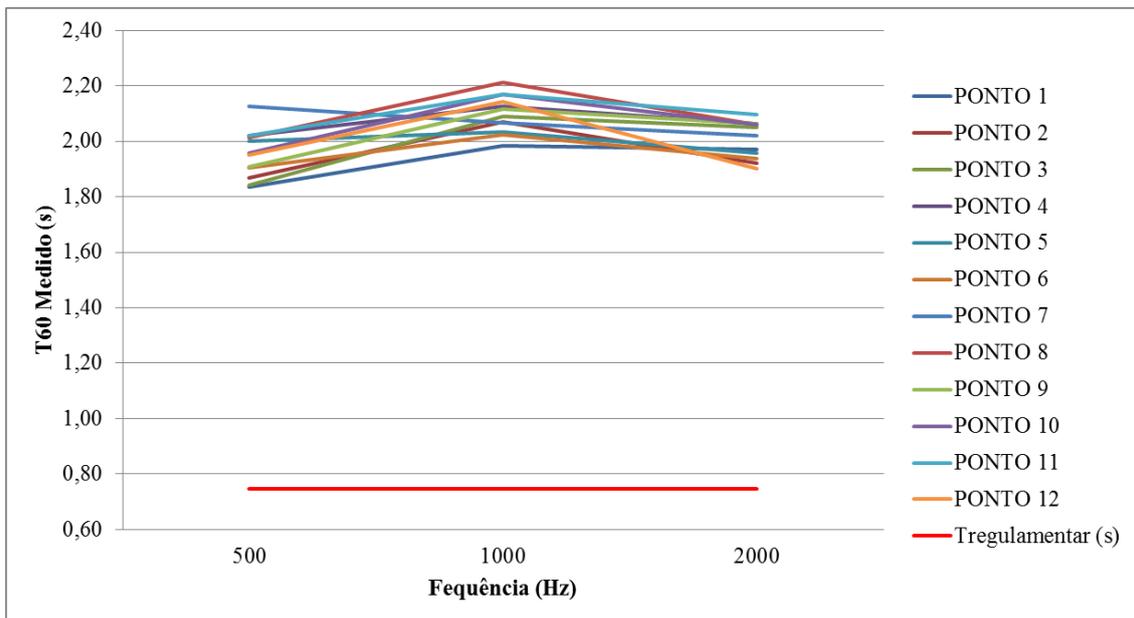


Figura 49 – T<sub>60</sub> medido - Anfiteatro EA2.05.

Verifica-se, na análise destas medições que nenhum dos anfiteatros cumpre o RRAE para as frequências centrais de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz, ficando os T<sub>60</sub> medido muito acima dos T<sub>regulamentares</sub>

Na Tabela 11 estão apresentados os valores médios  $T_{60}$  medidos.

Fazendo uma comparação com os valores apresentados na Tabela 10,  $T_{regulamentares}$ , verifica-se que nenhum dos anfiteatros cumpre o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz. É então necessário definir um projeto de reabilitação para todos os anfiteatros.

Tabela 8 – Valores médios  $T_{60}$  estimados.

Frequência (Hz)	Média $T_{60}$ medido (s)			
	B1.12	EA2.05	EC1.03	EE0.19
500	1,18	1,95	2,41	2,19
1000	1,27	2,10	2,60	2,29
2000	1,13	2,01	2,56	2,41

O Tempo de Reverberação Calculado é menor que o Tempo de Reverberação Medido e esta diferença de valores deve dar-se pelo facto do coeficiente de absorção sonora dos materiais utilizados na Equação de Sabine não serem os reais, ou seja, não são os coeficientes exatos a ser utilizados, pois os materiais que estão nos anfiteatros já têm outros tratamentos que não estão a ser considerados nos coeficientes de absorção sonora utilizados na Equação de Sabine.

Por isso, quando se calcula o  $T_{60}$  pela Equação de Sabine tem de se ter em conta que são valores aproximados e não os valores reais do espaço.

### 4.3. Inquéritos

#### 4.3.1. Inquéritos dos Alunos

- Há quantas horas seguidas está a ter aulas neste anfiteatro?

Com esta pergunta inicial foi apenas para se ter uma noção do tempo de aulas que os alunos estão dentro de cada anfiteatro, para entender melhor algumas respostas que poderiam ser obtidas.

Como se verificam nas Figura 50, o número de aulas predominante nos anfiteatros é de 1, 2 ou 3 horas.

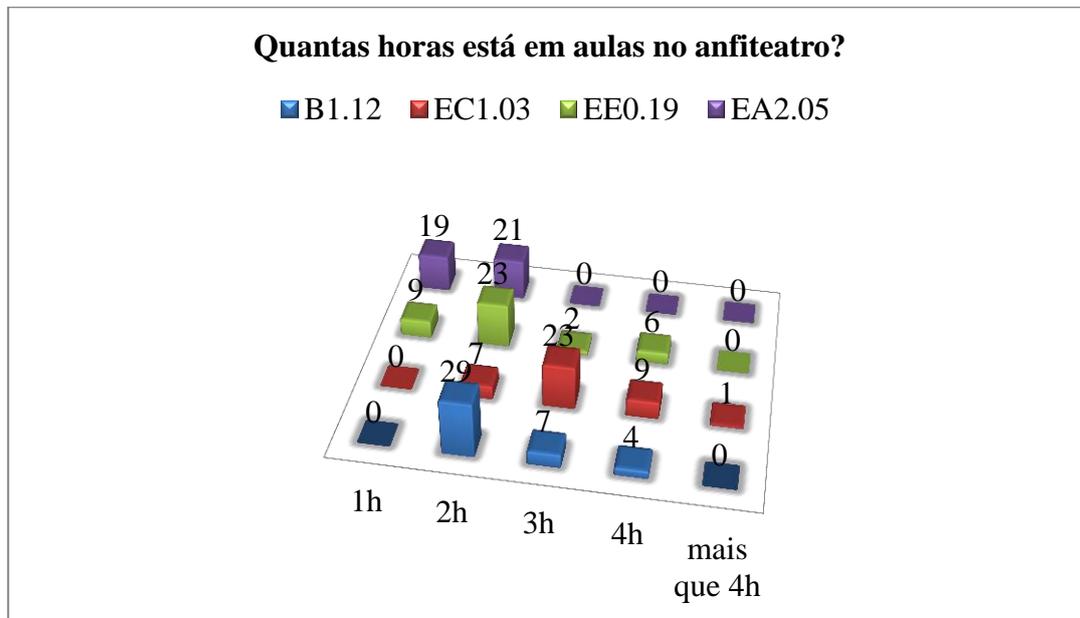


Figura 50 – Resposta dos alunos à questão 1.

- Como considera a percepção da palavra, do professor para o aluno?

Analisando o gráfico da Figura 51, relativa à resposta à questão de como consideram a percepção da palavra do professor para o aluno, verifica-se que o anfiteatro B1.12 é o que tem mais respostas “clara” embora nenhum dos anfiteatros tenha muitas respostas como “não perceptível”.

Quando existe diálogo entre alunos e professores é essencial que a reverberação não seja muito significativa que não exista eco e também que não haja muito mascaramento da voz. No anfiteatro B1.12, devido às características dos seus revestimentos, há probabilidades mais elevadas para que isso não aconteça do que nos outros anfiteatros.

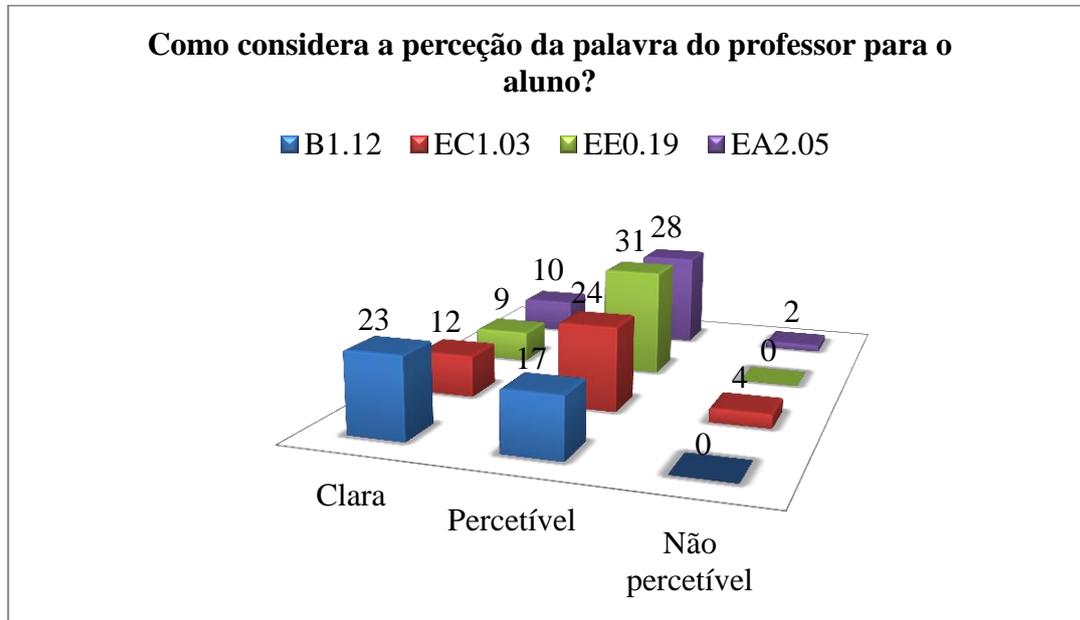


Figura 51 – Resposta dos alunos à questão 2.

- Como considera este anfiteatro durante as aulas?

Nos 4 anfiteatros existiu uma unanimidade nas respostas a esta pergunta, como se verifica na Figura 52.

Globalmente os alunos consideram os anfiteatros ruidosos. No anfiteatro B1.12, 70% dos alunos consideram este anfiteatro ruidoso e 65% no EE0.19. No anfiteatro EC1.03 e EA2.05, 85% dos alunos consideram os anfiteatros ruidosos.

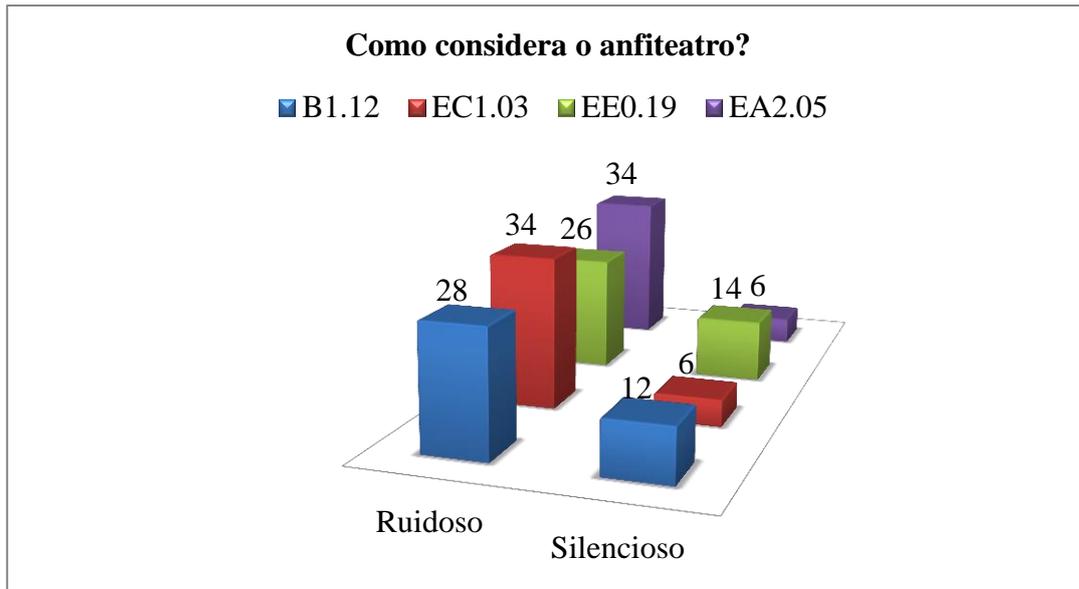


Figura 52 – Resposta dos alunos à questão 3.

- *Fica com dores de cabeça depois de uma aula neste anfiteatro?*

Os alunos não se queixam muito de dores de cabeça depois das aulas.

O anfiteatro com mais queixas é o EC1.03, o que pode ser originado pelo número de horas que os inquiridos passam no anfiteatro, de 3 a 4 horas seguidas, ao qual se junta as características do anfiteatro e os ruídos de fundo que possam existir.

Estes resultados podem ser verificados na Figura 53.

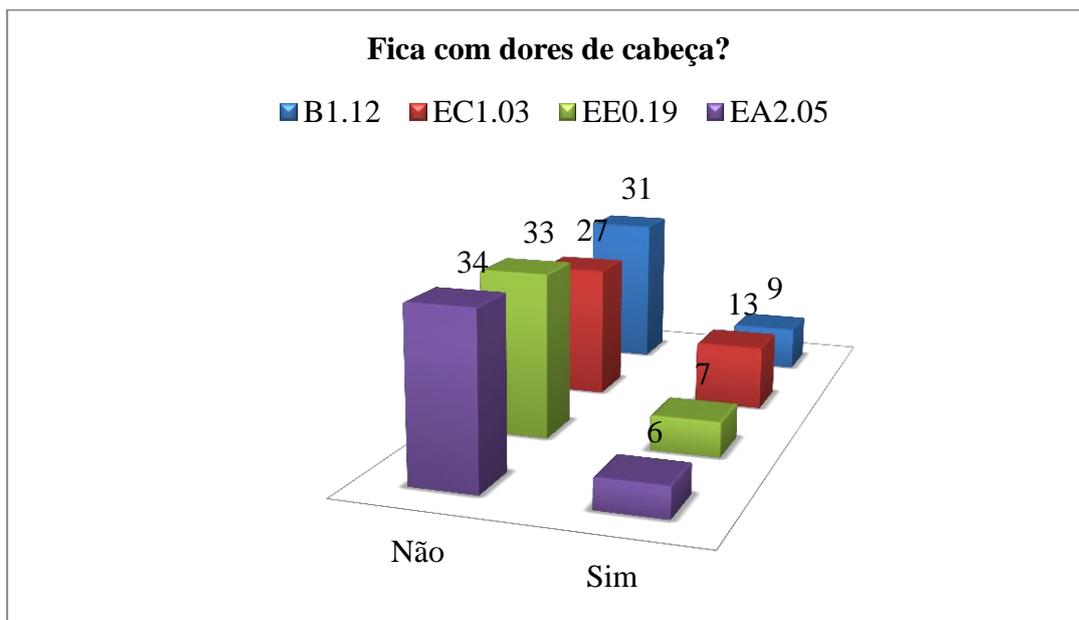


Figura 53 – Resposta dos alunos à questão 4.

- Quando os teus colegas de turma conversam na aula, ouves mais o professor ou o ruído dos colegas?

Nesta resposta, como se verifica na Figura 54, verifica-se que a voz do professor é encoberta pela voz dos alunos que conversam e torna-se inconveniente a outros alunos que querem estar atentos e ouvir a aula.

Existe um mascaramento da voz provocada pelo ruído de fundo e devido ao tamanho dos anfiteatros e às suas características que não são muito apropriadas acusticamente.

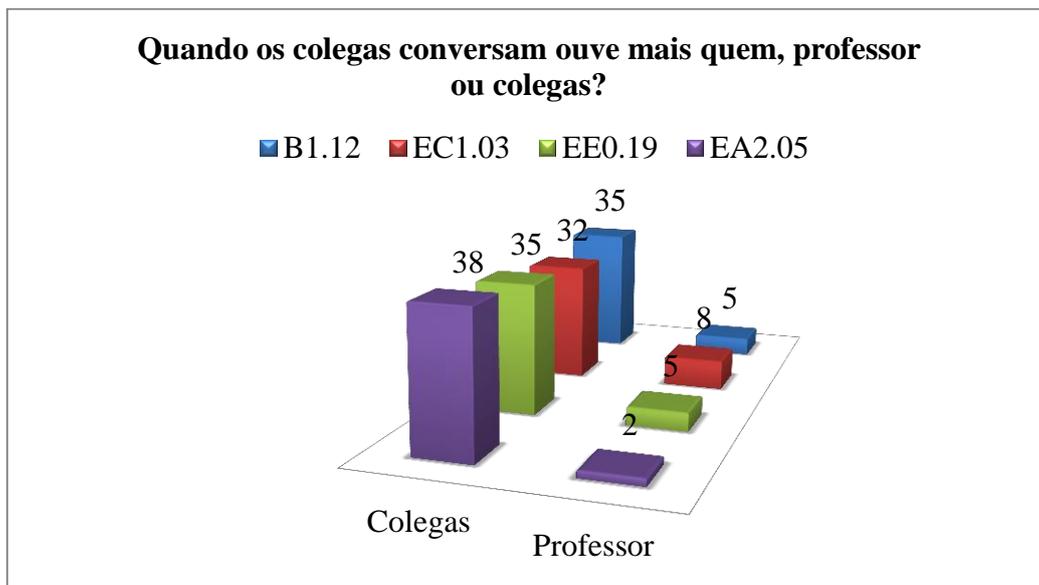


Figura 54 – Resposta dos alunos à questão 5.

- Qual é a sensação auditiva quando os teus colegas conversam?

Nesta resposta verifica-se o que mesmo que na resposta anterior e a resposta dos ocupantes indica que ocorre mascaramento da voz, eco e reverberação, e o ruído de fundo são causas da má percepção dos alunos numa sala de aula quando há conversas paralelas.

Como mostra a Figura 55, a sensação auditiva nos anfiteatros por parte dos alunos é má quando estes conversam.

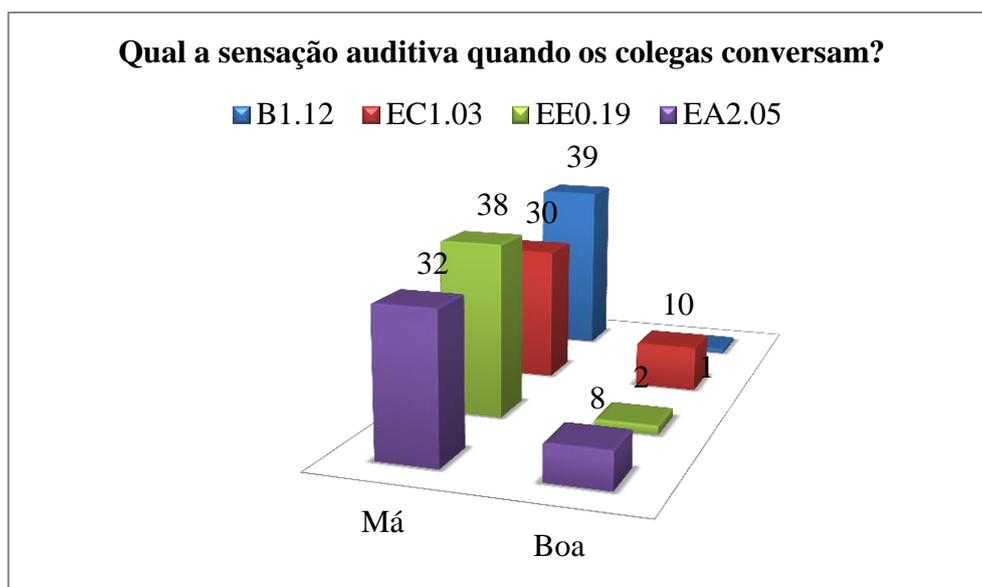


Figura 55 – Resposta dos alunos à questão 6.

- *Durante as aulas, sente desconforto acústico neste anfiteatro?*

No anfiteatro B1.12, 45% dos alunos refere que sente desconforto e 55% que não sente. Este anfiteatro é acusticamente melhor que os outros, embora as opiniões sejam repartidas.

No EC1.03, 60% dos alunos referem sentir desconforto acústico, e no EA2.05 70%. No EA2.05 no entanto, tem uma maior discrepância que o primeiro anfiteatro em relação às respostas e isto deve-se ao fato de que o anfiteatro é mais íngreme e mais reverberante por ser todo revestido a madeiras lisas.

No anfiteatro EE0.19, 57,5% dos alunos responderam que não se sentem desconfortáveis acusticamente. Tal dever-se ao fato de haver aulas com menos alunos e o anfiteatro ser menos revestido que os outros.

Estes resultados podem verificar-se na Figura 56.

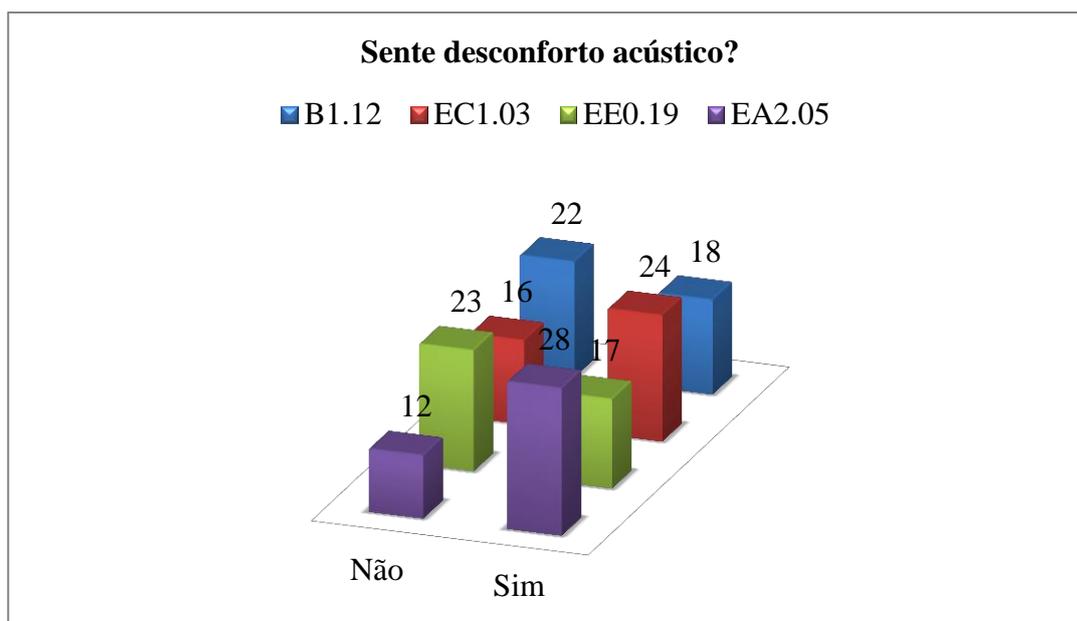


Figura 56 – Resposta dos alunos à questão 7.

- Como considera a qualidade acústica deste anfiteatro?

Na análise a esta pergunta verifica-se uma discrepância entre a resposta anterior e esta resposta, como se verifica na Figura 57.

Verifica-se que quando responderam que sentem desconforto acústico em seguida não respondem que a qualidade acústica do anfiteatro não é boa.

Nos anfiteatros B1.12 e EC1.03 nota-se mais essa discrepância, nos outros dois anfiteatros a qualidade é considerada de insatisfatória a boa. No entanto, nos quatro anfiteatros, o que predomina é a qualidade satisfatória da qualidade acústica.

Apesar de na questão 7 os alunos referirem a existência de desconforto acústico, não consideram que a qualidade acústica dos anfiteatros seja desadequada.

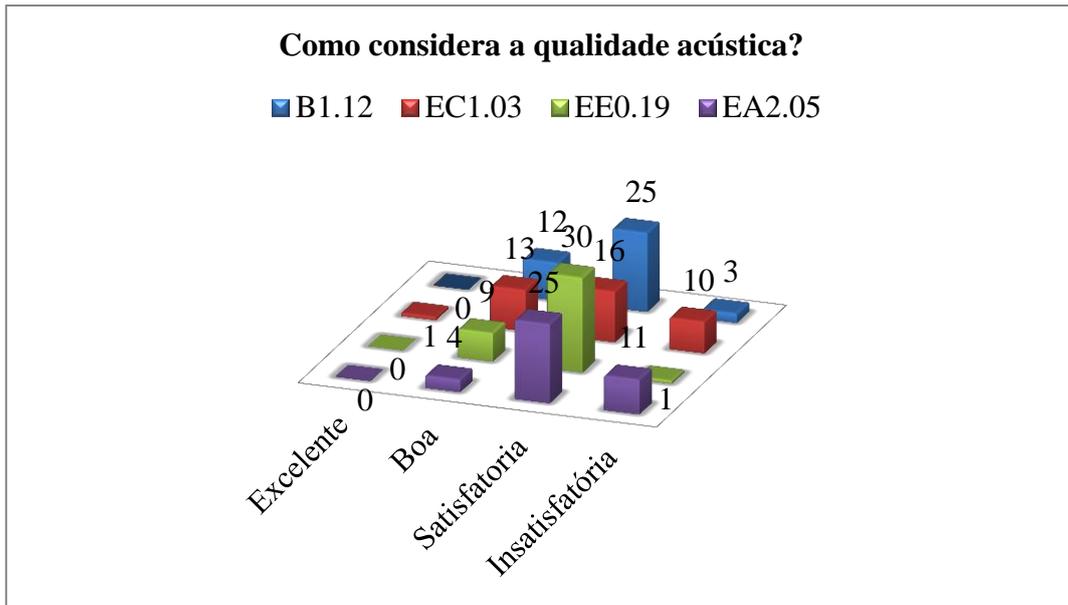


Figura 57 – Resposta dos alunos à questão 8.

- Sente que existe eco neste anfiteatro durante as aulas?

Como se verifica na Figura 58, no anfiteatro B1.12 90% dos alunos disse que não sente eco, nos dois seguintes anfiteatros, 80% e 85% dos alunos, respetivamente, disse que sente eco.

Em relação ao anfiteatro EE0.19, as respostas foram mais divididas, 55% dos alunos disseram que não sentem eco no anfiteatro enquanto 45% disseram que sentem.

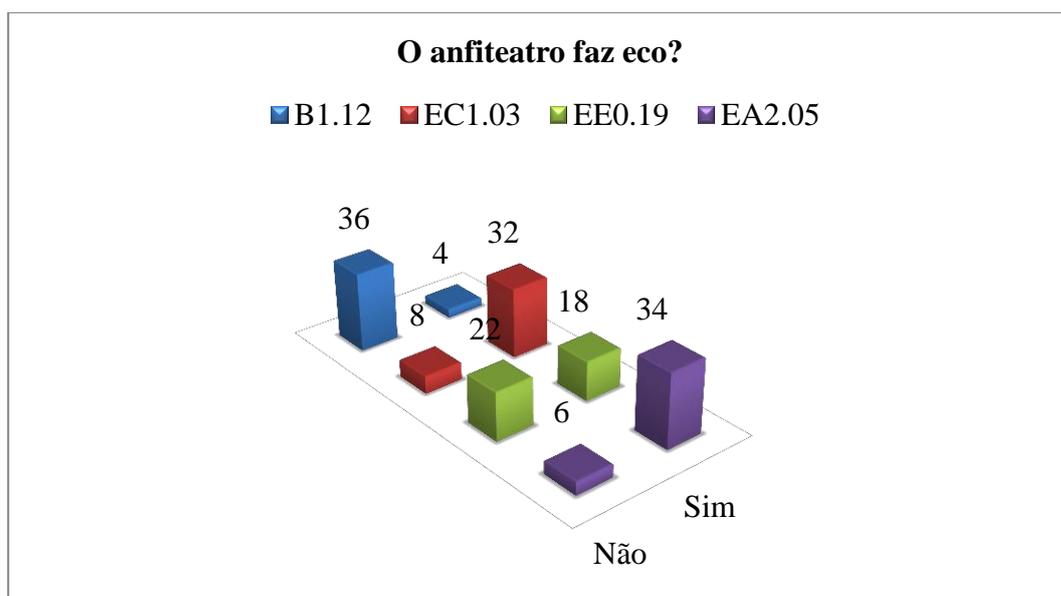


Figura 58 – Resposta dos alunos à questão 9.

- Quais os problemas acústicos que sentiam no anfiteatro?

A análise à amostra dos inquiridos efetuados, permitiu chegar às seguintes conclusões:

- No anfiteatro B1.12 os alunos queixam-se que nas últimas filas não ouvem bem o professor quando os colegas de turma estão a conversar e quando a sala está demasiado cheia não é fácil haver uma boa comunicação entre alunos e professor. Há também alunos que referem que o anfiteatro não apresenta problemas acústicos e que quando há poucos alunos em aula existe uma boa comunicação entre alunos e professor sendo a sala muito silenciosa e boa acusticamente.

- No anfiteatro EC1.03 os alunos queixaram-se essencialmente do eco e do ruído de fundo quando os alunos falam, mas outros também referem que quando existe uma aula em “calma” que a sala é boa acusticamente. No entanto quando existem aulas com muitos alunos o efeito é contrário e torna-se impossível ouvir o docente.

Neste anfiteatro nos lugares mais atrás não se ouve bem o professor pois o anfiteatro é muito comprido.

- No anfiteatro EE0.19 os alunos queixam-se de que quando os colegas mantêm conversas paralelas que existe muito ruído de fundo não conseguindo assim ouvir o professor. Quanto mais atrás da sala estiverem menos ouvem a aula, independentemente de os colegas estiverem a falar ou não e se a sala estiver cheia também não conseguem manter uma aula com boa qualidade acústica e com boa perceção da palavra. Referem também a existência do eco.

- No anfiteatro EA2.05 o problema referido foi o eco, a exagerada reverberação e ruído de fundo excessivo provocado pelas conversas paralelas dos alunos, não conseguindo ouvir o que o professor está a dizer.

Também nas últimas filas se ouve mal o professor devido ao ruído que se gera no anfiteatro devido a qualquer conversa ou outra forma de ruído que possa existir (como o próprio descer de escadas, posicionar-se nas cadeiras, cair de um lápis ao chão, entre outros).

#### 4.3.2. Inquéritos dos Docentes

- Quantas horas seguidas leciona neste anfiteatro?

As respostas dos docentes a esta questão estiveram entre as 2 e 3 horas.

- Como considera a perceção da palavra neste anfiteatro?

Todos os docentes responderam entre “clara” e “percetível” com a exceção dos docentes do anfiteatro EA2.05 que responderam “percetível” e “não perceptível”.

- Como considera este anfiteatro durante as aulas?

Todos os docentes responderam que consideram os anfiteatros, durante as aulas, ruidosos, com exceção de um docente no anfiteatro EC1.03 que o considerou silencioso.

- Fica com dores de cabeça depois de uma aula neste anfiteatro?

Esta pode ser ou não causada pela má acústica dos anfiteatros, no entanto os docentes responderam que não nos anfiteatros B1.12 e EC1.03 e só um docente disse que sim nos outros dois anfiteatros.

- Fica com dores de garganta depois de uma aula neste anfiteatro?

Em todos os anfiteatros os docentes se queixaram que ficam com dores de garganta depois de uma aula.

- Quando os alunos fazem uma pergunta como os ouve?

Devido à dimensão dos anfiteatros e à má qualidade acústica destes, quando os alunos fazem uma questão aos professores pode existir um mascaramento da voz que impossibilite o professor de ouvir a pergunta.

As respostas a esta questão foram divididas. Em todos os anfiteatros houve um docente que respondeu que ouvem bem os alunos e outro que respondeu que ouvem mal exceto no anfiteatro EA2.05 que os dois docentes responderam que ouvem mal a pergunta do aluno.

- Qual a sensação auditiva quando os alunos conversam?

A esta questão as respostas foram também parecidas, sendo maioritariamente “má”.

Quando se mantêm conversas paralelas entre os, torna-se impossível haver uma boa sensação auditiva como os docentes o mostram nas respostas.

Gera-se um ruído de fundo que torna difícil a transmissão da palavra e a sua receção gerando assim um desconforto acústico no anfiteatro.

- Durante a aula, sente desconforto acústico neste anfiteatro?

Segundo as respostas dos docentes os anfiteatros com maior desconforto acústico, são os anfiteatros EE0.19 e EA2.05.

- Quando um aluno faz uma pergunta e estão outros a conversar, como consegue ouvir a questão?

A resposta dos docentes a esta questão é para todos os anfiteatros de que ouvem mal. Sabendo que os alunos estão a conversar é fácil perceber que a questão não vai ser ouvida na perfeição pois, devido ao ruído de fundo e ao mascaramento da voz do aluno que está a questionar o professor, e também devido às propriedades do próprio anfiteatro, a voz não vai chegar clara e perceptível até ao professor.

- Como considera a qualidade acústica deste anfiteatro?

Os anfiteatros B1.12 e o EE0.19 em termos de qualidades acústicas foram considerados com satisfatório a bom enquanto o EA2.05 insatisfatório a satisfatório. O EC1.03 foi considerado insatisfatório e bom.

- Sente que este anfiteatro faz eco durante as aulas?

Os docentes responderam que os anfiteatros EE0.19 e EA2.05 fazem eco enquanto o anfiteatro B1.12 não. Nas respostas dadas para o anfiteatro EC1.03 obteve-se respostas divididas, um professor disse que sim e o outro disse que não faz eco.

- Quais os problemas acústicos que sentiam no anfiteatro?

- No anfiteatro B1.12 e para o EC1.03 nenhum professor respondeu a esta última questão.

- No anfiteatro EE0.19 os professores queixam-se do excesso de reverberação e, quando os alunos mantêm conversas paralelas, que existe muito ruído de fundo.

- No anfiteatro EA2.05 o maior problema é o eco e o ruído de fundo também provocados pelas conversas paralelas dos alunos, assim como o ruído exterior.

Fazendo uma análise comparativa, entre os inquéritos dos alunos e dos professores, mesmo que os inquéritos dos professores estejam em menor número que os dos alunos, reparou-se que professores e alunos têm a mesma opinião em relação aos anfiteatros, e portanto os problemas sugeridos e apontados são comuns.

#### 4.4. Aplicação do EASE *Software* para Modelação Acústica dos Anfiteatros

De modo a definir o projeto de reabilitação dos anfiteatros foi utilizado o *software* EASE.

Começou-se por simular a solução existente, de modo a assegurar que o modelo caracterizava a situação existente de forma adequada e de seguida definiu-se a solução de reabilitação.

Devido a problemas que surgiram ao longo do trabalho, problemas com o *software* que gerou falta de tempo, só foi possível estudar 2 dos 4 anfiteatros e impossibilitou o estudo pormenorizado dos outros dois.

Os anfiteatros escolhidos foram o anfiteatro B1.12 e o anfiteatro EA2.05.

Começou-se por importar a geometria dos anfiteatros para o EASE como mostram nas Figuras 59 e 60 e elaborou-se o resto do modelo, introduzindo os dados em falta como a fonte sonora, os recetores, os coeficientes de absorção sonora dos diferentes materiais (Tabela 5).

Depois de todos os parâmetros estarem introduzidos, obtém-se os tempos de reverberação dos dois anfiteatros, para as soluções existentes, que se mostram nas Figuras 61 e 62.

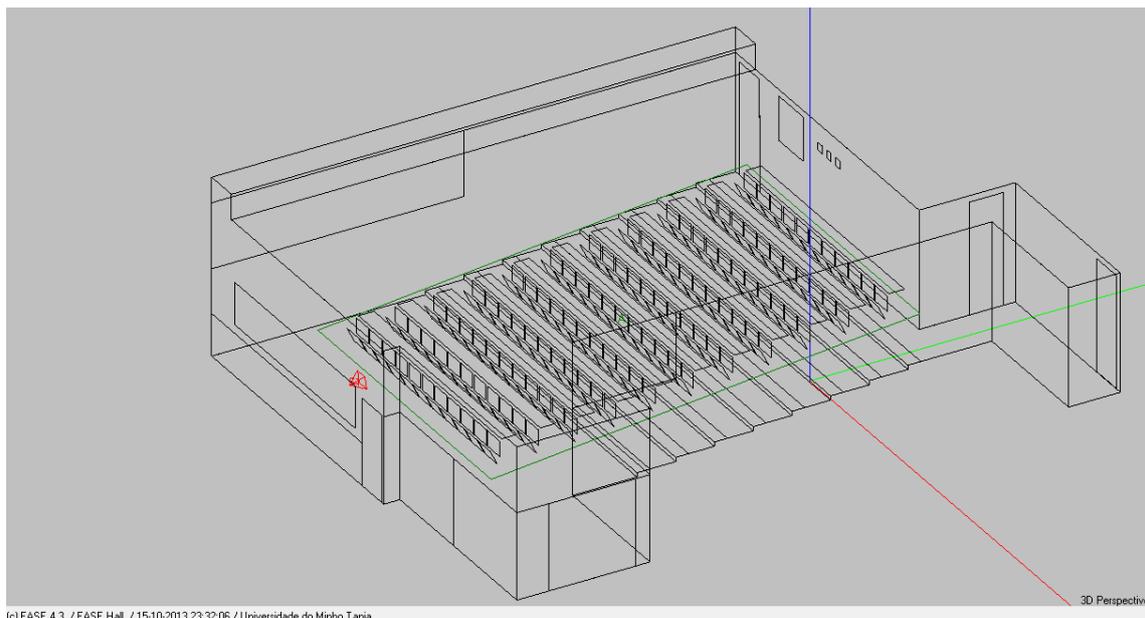


Figura 59 – Geometria do anfiteatro B1.12 no EASE.

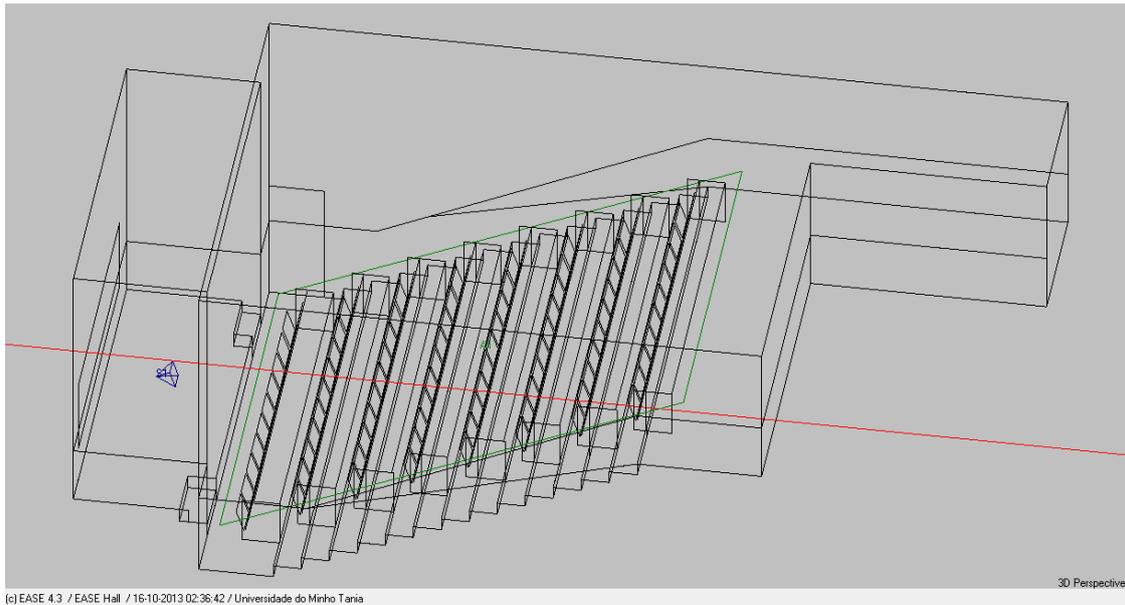


Figura 60 – Geometria do anfiteatro EA2.05 no EASE.

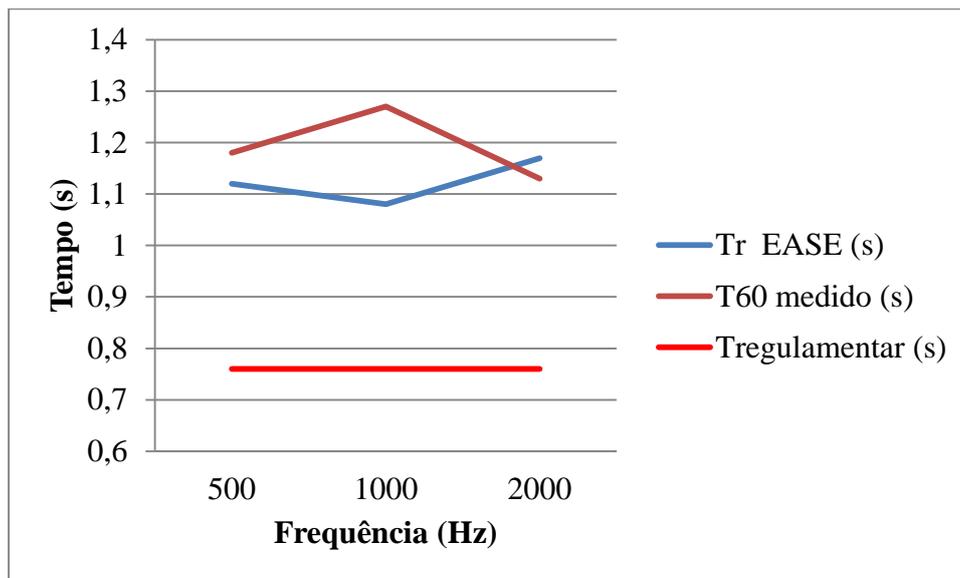


Figura 61 – Tempos de Reverberação B1.12 - solução existente.

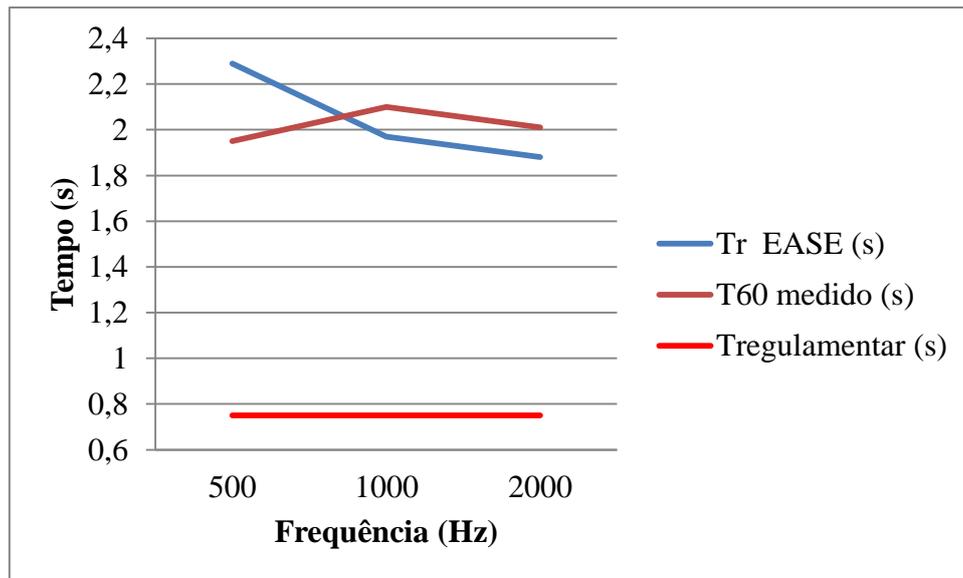


Figura 62 – Tempos de Reverberação EA2.05 - solução existente.

Comparando os Tempos de Reverberação das soluções existentes nos anfiteatros e os Tempos de Reverberação medidos verificam-se que estão próximos mas muito acima dos Tempos de Reverberação regulamentares impostos pelo Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz.

Como nenhum dos anfiteatros cumpre o RRAE, é então necessário definir um projeto de reabilitação para os dois anfiteatros.

#### 4.5. Descrição das soluções de reabilitação propostas

Tudo na natureza tem propriedades acústicas no entanto, uns materiais têm maiores e outros têm menores capacidades de absorção. Para a escolha destes materiais depende do que se quer para um determinada sala. Também tem que se ter certos cuidados com os excessos pois em vez de ajudar pode-se estar a prejudicar. Deve-se ter cuidado, por exemplo, com os índices de absorção acústica, porque quando são em excesso pode impedir que um aluno, por exemplo, numa sala de aula ouça bem o professor [CATAI, 2006; NAKAMURA, 2006].

A escolha do material a utilizar (revestimento) tem de ter em consideração a taxa de ocupação do ambiente de manutenção, durabilidade, estabilidade e resistência ao fogo [CATAI, 2006; NAKAMURA, 2006].

Pretende-se com a reabilitação dos anfiteatros, melhorar a sua qualidade acústica interior. Neste trabalho será efetuado o estudo das reabilitações dos anfiteatros de maneira a conservar o aspeto inicial do anfiteatro.

Normalmente os materiais absorventes para tratamentos acústicos são colocados no teto pois o teto é livre de mobílias e é difícil chegar até lá prevenindo assim que os materiais sejam danificados. No entanto, só colocar os materiais absorventes no teto não leva a resultados satisfatórios. Para se obter melhores resultados, os materiais deverão ser colocados em pelo menos duas superfícies diferentes para evitar reflexões indesejadas, por exemplo na parede de fundo e no teto [BRAGA, 2009].

No intuito de melhorar a qualidade acústica dos anfiteatros em estudo, simulou-se no *software* EASE, duas propostas de melhoria para cada um dos anfiteatros, substituindo o material existente em algumas das superfícies por placas de contraplacado de madeira perfurada e painéis ranhurados em cada uma das soluções (Figura 63).



Figura 63 - placas de contraplacado de madeira perfurada e painéis ranhurados.

Os coeficientes de absorção sonora dos materiais utilizados na reabilitação encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 – Coeficientes utilizados na reabilitação dos anfiteatros [BRAGA, 2009].

Materiais	Frequência (Hz)		
	500	1000	2000
Placas de contraplacado de madeira perfurada	0,86	0,64	0,5
Painéis ranhurados	0,65	0,68	0,55

#### 4.5.1. Anfiteatro B1.12

A primeira hipótese que foi testada para reabilitação do anfiteatro B1.12 foi a aplicação de placas de contraplacado de madeira perfurada.

Começou por se seguir o que anteriormente foi referido, para obter melhores resultados, que foi a substituição do revestimento da parede de fundo e do teto por estas placas, mas esta solução não é possível pois obtiveram-se valores muito baixos de Tempos de Reverberação o que poderia levar a um “abafamento” do som.

Sendo assim optou-se por não colocar as placas de contraplacado de madeira perfurada no teto e colocar nas paredes de fundo e laterais, na área revestida a cortiça, obtendo-se valores mais próximos do Tregulamentar, cumprindo o RRAE (Figura 64).

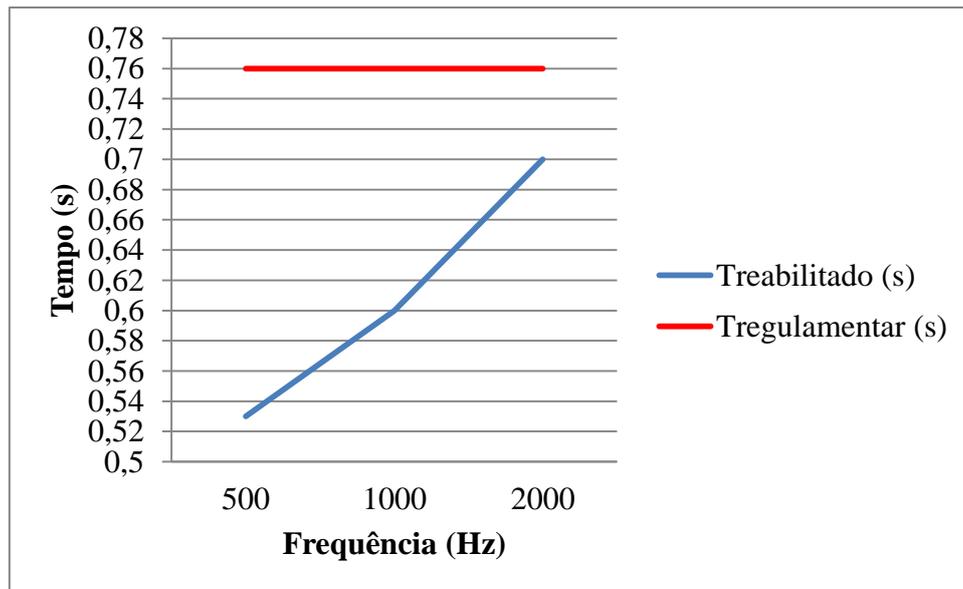


Figura 64 – Tr para a primeira reabilitação do anfiteatro B1.12.

A segunda hipótese de reabilitação deste anfiteatro foi a aplicação de painéis ranhurados.

Novamente começou-se por fazer a substituição dos materiais de revestimento da parede de fundo e do teto do anfiteatro pelos painéis ranhurados e novamente se verificou que era em excesso para o anfiteatro em estudo, pela mesma razão que a hipótese anterior.

Fez-se então a substituição do revestimento de cortiça da parede de fundo e de uma das paredes laterais, visto que se fossem as duas paredes laterais também descia demasiado os valores do Tr.

Com esta solução os valores estão abaixo do  $T_{\text{regulamentar}}$  mas muito exagerados, como se verifica na Figura 65, cumprindo assim o RRAE.

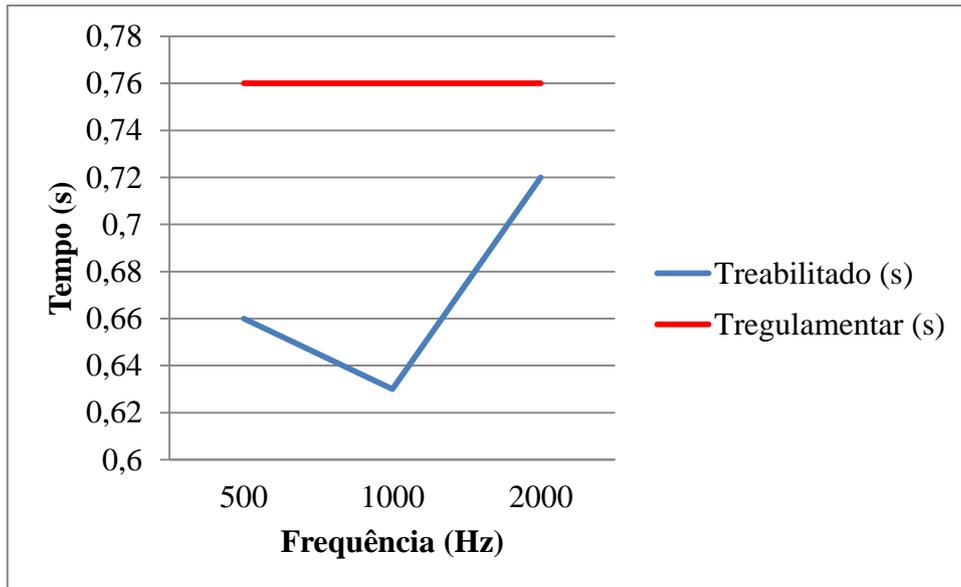


Figura 65 – Tr para a segunda reabilitação do anfiteatro B1.12.

#### 4.5.2. Anfiteatro EA2.05

No anfiteatro EA2.05 também foram feitas duas hipóteses de reabilitação como no anfiteatro B1.12.

Começou-se, na primeira hipótese, por substituir o revestimento de madeira da parede de fundo e o revestimento de gesso cartonado do teto pelas placas de contraplacado de madeira perfurada e obtiveram-se os valores da Figura 66.

Os valores obtidos estão abaixo do  $T_{\text{regulamentar}}$ , cumprindo assim o RRAE.

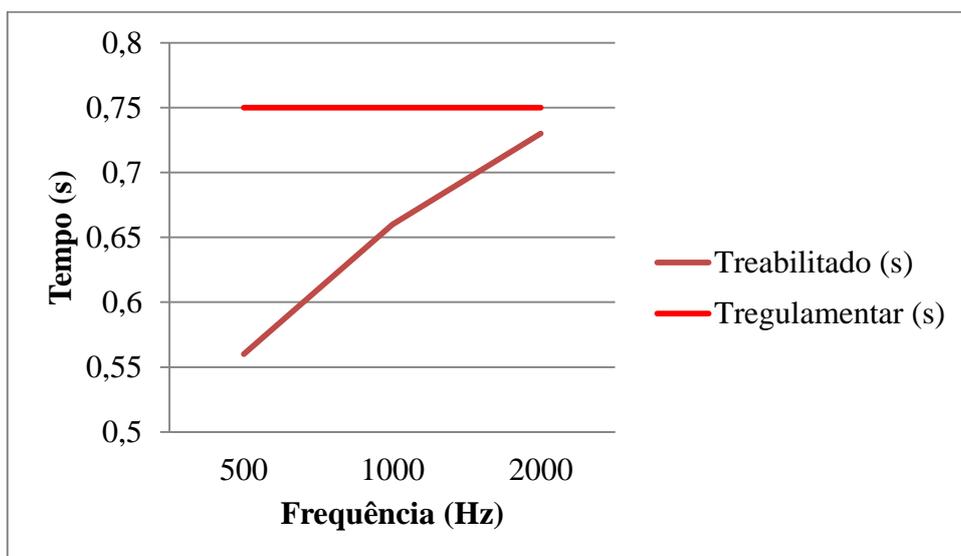


Figura 66 – Tr para a primeira reabilitação do anfiteatro EA2.05.

Na segunda hipótese também se substituiu o revestimento de gesso cartonado do teto e o revestimento de madeira da parede de fundo mas desta vez por painéis ranhurados. Com a aplicação destes painéis também se conseguiu baixar os Tempos de Reverberação (Figura 67) fazendo com que este anfiteatro também cumpra o RRAE.

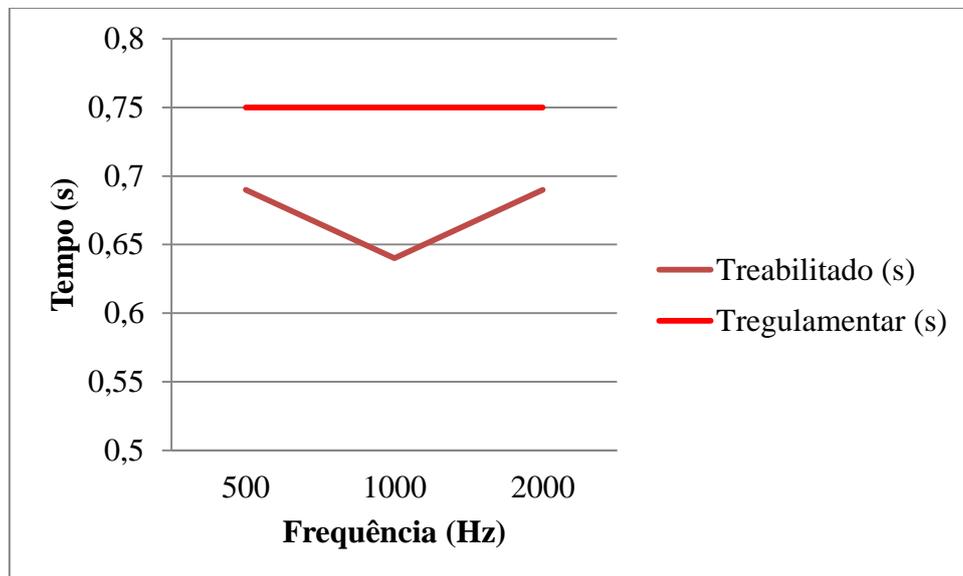


Figura 67 – Tr para a segunda reabilitação do anfiteatro EA2.05.

***Capítulo 5***



## 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

### 5.1. Conclusão

Como foi referido ao longo deste trabalho, o ruído é prejudicial ao Homem e pode causar vários efeitos negativos na sua saúde. O mesmo sucede com uma má qualidade acústica de salas. Quando uma sala não é boa acusticamente, apresentando tempos de reverberação desadequados por exemplo, podem existir diversos problemas para quem permanece no seu interior tais como dores de cabeça, dores de garganta (para os oradores), o que pode provocar mal-estar, entre outros, comprometendo assim o processo de ensino-aprendizagem entre alunos e professores.

Assim, este trabalho teve como objetivo a avaliação da qualidade acústica de quatro anfiteatros do Campus de Azurém da Universidade do Minho, em Guimarães, nomeadamente o anfiteatro B1.12 que se situa no Edifício B deste Campus, o anfiteatro EE0.19 da Escola de Engenharia, o anfiteatro EC1.03 da Escola de Ciências, e o anfiteatro EA2.05 da Escola de Arquitetura.

Todos estes anfiteatros são utilizados para aulas, palestras e apresentações, onde a perceção e inteligibilidade da palavra é fundamental e tem um papel preponderante.

Neste estudo foi previsto o tempo de reverberação pela Equação de Sabine, foi medido “*in situ*” por meio de equipamentos de medição acústica e foram também realizados inquéritos para análise da sensibilidade dos ocupantes dos anfiteatros.

Com estas informações, foram propostas duas soluções de correção acústica aos dois anfiteatros que estudados, dos que não cumpriam o RRAE.

Conclui-se então, nesta dissertação, que o Tempo de Reverberação ( $T_{60}$ ) Calculado e o Tempo de Reverberação ( $T_{60}$ ) Medido têm valores distintos, sendo o  $T_{60}$  Calculado menor que o  $T_{60}$  Medido. Esta diferença de valores deve dar-se pelo facto do coeficiente de absorção sonora dos materiais não serem os reais. Por isso, quando se calcula o  $T_{60}$  pela Equação de Sabine tem de se ter em conta que são valores aproximados e não os valores reais do espaço.

Verificou-se então que o melhor anfiteatro em termos acústicos é o anfiteatro B1.12 e o pior acusticamente é o EC1.03. O anfiteatro B1.12, em termos de  $T_{60}$  calculado, de acordo

com a Equação de Sabine, cumpre o Regulamento de Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz. Esse anfiteatro é o anfiteatro que se situa no Edifício B do Campus de Azurém.

No entanto, nenhum dos anfiteatros cumpre o Regulamento de Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz para o  $T_{60}$  medido, o que leva a que todos tenham que ser reabilitados.

Na análise dos inquéritos, que foram realizados no decorrer deste estudo, e reparou-se que professores e alunos têm a mesma opinião em relação aos anfiteatros, e portanto os problemas sugeridos e apontados são comuns. Todos eles apontaram que os anfiteatros são ruidosos e que se torna difícil a perceção da palavra entre professor e aluno, a sensação auditiva é má, sentem desconforto acústico e nos anfiteatros EC1.03, EA2.05, EE0.19 tanto alunos como professores referem sentir eco nas aulas, enquanto no anfiteatro B1.12 responderam que não o sentem.

Em relação ao conforto e desconforto acústico nos anfiteatros por parte de alunos e professores deparou-se que nos inquéritos queixaram-se menos do anfiteatro EE0.19

Nos anfiteatros, as soluções de melhoria apresentadas foram a substituição de parte do material de revestimento existente por placas de contraplacado de madeira perfurada ou painéis ranhurados. Nos dois anfiteatros fez-se duas hipóteses de soluções de melhoria acústica com estas duas soluções.

No anfiteatro EA2.05, fez-se a substituição dos revestimentos de madeira da parede de fundo e das paredes laterais, nas duas hipóteses, por estes dois materiais absorventes acústicos e nas duas hipóteses os Tempos de Reverberação baixaram cumprindo assim o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios.

Também no anfiteatro B1.12 fez-se a substituição dos revestimentos de cortiça da parede de fundo e de uma das paredes laterais (visto que ao colocar nas duas paredes laterais seria em excesso) e para as duas hipóteses também cumpriu o Regulamento baixando os Tempos de Reverberação.

## **5.2. Trabalhos futuros**

Como trabalhos futuros seria de interesse aperfeiçoar as soluções de melhoria ou realizar conjuntos de soluções para os anfiteatros que foram estudados.

Seria de interesse também efetuar simulações acústicas nos anfiteatros que não foram simulados para que o trabalho ficasse completo e assim poder propor soluções de melhoria para os anfiteatros que não foram simulados e apresentar o preço das soluções acústicas para todos os anfiteatros.

Para que o estudo ficasse ainda mais completo propõe-se calcular outros parâmetros acústicos além do tempo de reverberação para ter uma pesquisa mais aprofundada sobre os anfiteatros.

Depois de todo o estudo pormenorizado e propostas de outras soluções acústicas para os anfiteatros da universidade, assim como o custo da reabilitação destes propor soluções de melhoria dos anfiteatros, à universidade, para que haja maiores e melhores condições acústicas para alunos e professores durante as aulas e palestras que se possam a vir a desenvolver nestes ou noutros anfiteatros com as mesmas características.



***Bibliografia***



## **Bibliografia**

ALMEIDA, Manuela G. de, SILVA, Sandra M. da, Apontamentos de Física das Construções: Fundamentos de Acústica Ambiental e de Edifícios, capítulos 7, 8, 9 e 10, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2009.

BARBOSA, Maria S. A. – Ruído e desempenho cognitivo dos professores: um estudo exploratório. Dissertação apresentada à Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 2009.

BASTOS, Leonardo J. R. – Qualidade Acústica de Auditórios. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, 2010.

BISTAFA, Sylvio R., Acústica aplicada ao controle do ruído. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

BRAGA, Nuno M. M. – Caracterização da qualidade acústica interior e propostas para soluções de reabilitação de um anfiteatro da Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Projeto individual apresentado à Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 2009.

CARBONI, Márcio H. de S. – Qualidade acústica em salas de ensino de música. Dissertação apresentada à Universidade Federal do Paraná, 2012.

CARVALHO, Magda A. da C. de, – Caracterização da qualidade acústica da Catedral Metropolitana de Campinas – Brasil. Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Nova Lisboa, 2012.

CARVALHO, Régio P., Acústica Arquitetónica, Revista e Ampliada, 2ª edição, 2010.

CATAI, Rodrigo E., PENTEADO, André P., DALBELLO, Paula F., Materiais, Técnicas e Processos para Isolamento Acústico, Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2006.

Decreto-Lei nº 96/2008 de 9 de Junho, Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2008.

DEC/LFTC/P03 – Procedimento de ensaio - Avaliação dos tempos de reverberação, Laboratório de Física e Tecnologia das Construções, Universidade do Minho, 2010.

GIL, Luís, A cortiça como material de construção. Manual Técnico. Portugal, 2012.

IIDA, Itiro, Ergonomia – Projeto e produção. 2ª Edição revisada e ampliada, São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

LORO, C. L. P. – Avaliação acústica de salas de aula – Estudo de caso em salas de aula Padrão – 023 da rede pública. Dissertação apresentada à universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

LOSSO, Marco A. F. – Qualidade acústica de edificações escolares em Santa Catarina: avaliação e elaboração de diretrizes para projeto e implantação, Dissertação apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

MASIERO, Bruno S. – Estudo e Implementação de métodos de medição de resposta impulsiva em salas de pequeno porte. Relatório final de iniciação científica apresentado à FAPESP, São Paulo, 2004.

NAKAMURA, Juliana, Conforto acústico, Revista Técnica, 106ª Edição, Ano XIV, 2006.

MATEUS, Diogo, Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído, FCTUC 2008.

PEREIRA, Ricardo N. – Caracterização Acústica de Salas. Dissertação apresentada à Universidade Técnica de Lisboa, Departamento de Engenharia Física Tecnológica, 2010.

REIS, Maria de L. B. C, MOREIRA, Anabela M, Propriedades dos Materiais, Materiais de Construção 1, DEC Instituto Politécnico de Tomar, 2008/2009.

TECNIWOOD, Algumas Noções de Acústica, Timber acoustic, disponível em [http://www.damadeira.pt/xFiles/scContentDeployerTimber\\_pt/docs/Doc134.pdf](http://www.damadeira.pt/xFiles/scContentDeployerTimber_pt/docs/Doc134.pdf), consultado em 06/02/2013.

User's Guide e Tutorial, EASE, Version 4.3, Renkus-Heinz, 2009.

VIANNA, Nelson S., RAMOS, José O., Acústica arquitetônica & urbana. Apostila do Curso de Extensão em Arquitetura e Urbanismo da Empresa YCON, 2005.

ZWIRTES, Daniele P. Z. – Avaliação do desempenho acústico de salas de aula: estudo de caso nas escolas estaduais do Paraná. Dissertação apresentada à Universidade Federal do Paraná, 2006.

DOMINGUES, Maria O. – Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros - Coeficientes de absorção sonora. A acústica nos Edifícios, LNEC, 2010.

“Absorbentes Selectivos: soluciones efectivas a problemas específicos”. Consultado a 21/10/2013. [www.lemovacustica.com](http://www.lemovacustica.com). Disponível na Internet: <http://www.lemovacustica.com/absorbentes-selectivos-soluciones-efectivas-a-problemas-especificos/>

“Acústica e Isolamento Sonoro de Edifícios”. Consultado a 21/10/2013. Disponível na Internet: <http://www.engenhariacivil.com/acustica-isolamento-sonoro-edificios>.

“Google maps”. Consultado a 21/10/2013. Disponível na Internet: <https://maps.google.pt/>



*Anexos*



## Anexo 1

### Inquéritos

#### INQUÉRITO SOBRE: CONFORTO ACÚSTICO (ALUNO)

Este auditório está a ser estudado no âmbito do trabalho de investigação da Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil pretendendo-se desenvolver o “Estudo da qualidade acústica dos anfiteatros da Universidade do Minho – Campus de Azurém”.

O objetivo deste inquérito é avaliar a opinião dos utilizadores deste auditório relativamente ao seu ambiente acústico, de modo a identificar os fatores psico-sociais que influenciam a sensação de conforto acústico.

Os resultados deste inquérito complementarão as medições do tempo de reverberação efectuadas.

Sendo a sua participação essencial para o desenvolvimento deste estudo, pede-se que responda com franqueza às perguntas que são apresentadas de seguida. Salienta-se ainda que todas as respostas são confidenciais e anónimas, sendo os dados tratados apenas para fins estatísticos.

Muito obrigada pelo tempo despendido e pela sua cooperação.

---

1. Sala: \_\_\_\_\_

2. Género:

Feminino

Masculino

3. Neste auditório, durante as aulas, considera a perceção da palavra, do professor para aluno, como:

Clara

Percetível

Não perceptível

4. Há quantas horas seguidas está a ter aulas neste auditório?  
1       2       3       4       Mais (quantas?) \_\_\_\_\_

5. Como considera este auditório durante as aulas?  
Ruidoso       Silencioso

6. Fica com dores de cabeça depois de uma aula neste auditório?  
Sim       Não

7. Quando os seus colegas de turma estão a conversar ouves mais:  
O Professor       Os Colegas

8. Qual é a sensação auditiva quando os alunos conversam?  
Boa       Má

9. Durante as aulas, sente desconforto acústico neste auditório?  
Sim       Não

10. Considera a qualidade acústica deste auditório:  
Insatisfatória       Satisfatória       Boa       Excelente

11. Sente que este auditório faz “eco” durante as aulas?  
Sim       Não

12. Quais os problemas acústicos que sente neste auditório? (responda de forma clara e perceptível)

---

---

---

---

AGRADEÇO O TEMPO DESPENDIDO NO PREENCHIMENTO DESTE INQUÉRITO.

MUITO OBRIGADA.

INQUÉRITO SOBRE: CONFORTO ACÚSTICO (PROFESSOR)

Este auditório está a ser estudado no âmbito do trabalho de investigação da Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, pretendendo-se desenvolver o “Estudo da qualidade acústica dos anfiteatros da Universidade do Minho – Campus de Azurém”.

O objetivo deste inquérito é avaliar a opinião dos utilizadores deste auditório relativamente ao seu ambiente acústico, de modo a identificar os fatores psico-sociais que influenciam a sensação de conforto acústico.

Os resultados deste inquérito complementarão as medições do tempo de reverberação efectuadas.

Sendo a sua participação essencial para o desenvolvimento deste estudo, pede-se que responda com franqueza às perguntas que são apresentadas de seguida. Salienta-se ainda que todas as respostas são confidenciais e anónimas, sendo os dados tratados apenas para fins estatísticos.

Muito obrigada pelo tempo despendido e pela sua cooperação.

---

1. Sala: \_\_\_\_\_

2. Género:

Feminino

Masculino

3. Neste auditório, durante as aulas, considera a perceção da palavra como:

Clara

Percetível

Não perceptível

4. Quantas horas, seguidas, de aulas leciona neste auditório?

1

2

3

4

Mais (quantas?) \_\_\_\_\_

5. Como considera este auditório durante as aulas?

Ruidoso

Silencioso

6. Fica com dores de cabeça depois de uma aula neste auditório?

Sim  Não

7. Fica com dores de garganta depois de uma aula neste auditório?

Sim  Não

8. Quando os alunos fazem uma pergunta ouve-os:

Bem  Mal

9. Qual é a sensação auditiva quando os alunos conversam?

Boa  Má

10. Durante as aulas, sente desconforto acústico neste auditório?

Sim  Não

11. Quando um aluno faz uma pergunta e os outros conversam consegue ouvir a questão:

Bem  Mal

12. Considera a qualidade acústica deste auditório:

Insatisfatória  Satisfatória  Boa  Excelente

13. Sente que este auditório faz “eco” durante as aulas?

Sim  Não

14. Quais os problemas acústicos que sente neste auditório? (escreva de forma clara e perceptível)

---

---

---

AGRADEÇO O TEMPO DESPENDIDO NO PREENCHIMENTO DESTE INQUÉRITO.

MUITO OBRIGADA.