



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Pedro Daniel Marques Valente de Almeida

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ACÚSTICO E
ESTRATÉGIAS DE MELHORIA EM REFEITÓRIOS
ESCOLARES: CASO DE ESTUDO NA LOUSÃ

Dissertação no âmbito do Mestrado em Reabilitação de Edifícios, orientada pelo Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus, pelo Professor Doutor José António Raimundo Mendes da Silva, apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Março 2019



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Pedro Daniel Marques Valente de Almeida

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ACÚSTICO E ESTRATÉGIAS DE MELHORIA EM REFEITÓRIOS ESCOLARES: CASO DE ESTUDO NA LOUSÃ

Dissertação no âmbito do Mestrado em Reabilitação de Edifícios, orientada pelo Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus, pelo Professor Doutor José António Raimundo Mendes da Silva, apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

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

Março de 2019

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus e ao Professor Doutor José António Raimundo Mendes da Silva, pela orientação, partilha de conhecimento e incentivo a não desistir.

A todos os professores e convidados, do MRE 2017/2019, pela partilha de conhecimento, e aos meus colegas, pelo convívio e apoio.

À Câmara Municipal da Lousã, pela possibilidade da realização deste estudo, em particular, à Eng^a Margarida Maia e Vereadora Henriqueta Oliveira, pela informação disponibilizada e logística na realização dos ensaios.

À minha família, por toda a paciência, apoio e incentivo demonstrado.

Aos meus avós, pelo exemplo de vida que sempre serão para mim, é a vocês que dedico esta dissertação.

RESUMO

O presente trabalho avalia o desempenho acústico de refeitórios escolares pertencentes ao Município da Lousã. Estes são espaços onde os alunos realizam as suas refeições e naturalmente aproveitam para conviver. Consequência disso, deverá ser garantido nestes espaços um ambiente sonoro tranquilo.

O ruído presente nos refeitórios é um problema atual que para além da incomodidade gerada, quer a alunos, quer aos restantes utentes, em casos mais avançados poderá causar alguns problemas de saúde, nomeadamente distúrbios psicológicos e *stress*. É assim fundamental o estudo do condicionamento acústico neste tipo de espaços, de forma a serem cumpridos os requisitos acústicos impostos pela legislação portuguesa em vigor.

Assim sendo foram seleccionadas para estudo três refeitórios escolares do concelho da Lousã, em que foram realizados ensaios acústicos *in-situ* permitindo assim, conhecer o comportamento acústico daqueles espaços. Realizaram-se medições acústicas com os refeitórios vazios permitindo recolher, os resultados dos tempos de reverberação e parâmetros acústicos associados à inteligibilidade da palavra. Em dois refeitórios foram medidos os níveis de ruído ambiente, a fim de perceber o nível de exposição a que estão sujeitos os utilizadores desses espaços.

Após os ensaios e para o caso de estudo mais relevante, são apresentadas estratégias de intervenção tendo em vista a correção acústica daquele espaço. Para isso, procedeu-se à elaboração de um modelo a 3D e à simulação de resultados a partir de vários exemplos de estratégias de intervenção, recorrendo a materiais e soluções de mercado. Da comparação de resultados foi ainda possível realizar um estudo paramétrico entre as possíveis soluções. Dado que os refeitórios escolares são espaços com regras próprias de higiene, optou-se pelo estudo apenas de soluções que consigam cumprir esses mesmos requisitos.

No final foi possível dar a conhecer os problemas atuais do comportamento acústico nos refeitórios escolares, corrigindo-os com propostas de intervenção adequadas ao espaço.

Palavras-chave: condicionamento acústico, refeitórios, ruído, modelo, intervenção

ABSTRACT

The present work evaluates the acoustic performance of school canteens belonging to the Municipality of Lousã. These are spaces where students take their meals and naturally take the opportunity to socialize. Consequently, a quiet sound environment should be guaranteed in these spaces.

The noise present in the school cafeterias is a current problem, which in addition to the discomfort generated, both students and other users, in more advanced cases can cause some health problems, including psychological disorders and stress. It is therefore fundamental to study the acoustic conditioning in this type of spaces in order to comply with the acoustic requirements imposed by the Portuguese legislation in force.

Therefore, three school cafeterias were selected for the study in the municipality of Lousã, in which acoustic tests will be carried out *in situ*, enabling us to know the acoustic behaviour of those spaces. Acoustic measurements were performed with empty school cafeterias allowing to collect the results of reverberation times and acoustic parameters associated with word intelligibility. In two school cafeterias, the ambient noise levels were measured in order to perceive the levels of exposure to which the users of these spaces are subjected.

After the tests, and for the most relevant case study, intervention strategies are presented with a view to acoustic correction of that space. For this, a 3D model and the simulation of results were elaborated, based on several examples of intervention strategies, using market materials and solutions. From the comparison of results, it was also possible to carry out a parametric study among the possible solutions. Since school cafeterias are spaces with their own rules of hygiene, we have chosen to study only solutions that can fulfil those same requirements.

In the end, it was possible to present the current problems of acoustic behaviour in school cafeterias, correcting them with appropriate intervention proposals for the space.

Keywords: acoustic conditioning, school cafeterias, noise, model, intervention

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	Conceitos gerais de acústica.....	3
2.1	Introdução	3
2.2	Parâmetros acústicos mais relevantes	5
2.2.1	Conceitos básicos	5
2.2.2	Tempo de reverberação	7
2.2.3	Relação Sinal/Ruído	10
2.2.4	Inteligibilidade da palavra: %ALCons, STI/Rasti e D ₅₀	14
2.3	Requisitos regulamentares	18
2.4	Exemplos de estratégias de intervenção e melhoria	19
3	CASO DE ESTUDO	24
3.1	Caraterização dos refeitórios	24
3.1.1	Refeitório EB1 da Lousã	25
3.1.2	Refeitório EB2 da Lousã	26
3.1.3	Refeitório EB/JI Santa Rita	28
3.2	Medições acústicas	30
3.3	Resultados das medições acústicas	31
3.3.1	Resultados do parâmetro T ₂₀	31
3.3.2	Resultados dos parâmetros D ₅₀ , RASTI e STI	32
3.3.3	Resultado do nível de pressão sonora	32
3.4	Análise de resultados	33
4	MODELAÇÃO ACÚSTICA DO REFEITÓRIO DA EB2 DA LOUSÃ	37
4.1	Apresentação da metodologia	37
4.1.1	Coeficientes de absorção α	39
4.1.2	Fontes e recetores	40
4.2	Calibração do modelo	42
4.2.1	1ª iteração para calibração	43
4.2.2	2ª iteração para calibração	44
4.2.3	3ª iteração para calibração	46

5	ESTRATÉGIAS DE INTERVENÇÃO DE CORREÇÃO ACÚSTICA	49
5.1	Metodologia e soluções construtivas	49
5.1.1	1ª estratégia de intervenção e simulação	50
5.1.2	2ª estratégia de intervenção e simulação	52
5.1.3	3ª estratégia de intervenção e simulação	54
5.1.4	4ª estratégia de intervenção e simulação	56
5.1.5	5ª estratégia de intervenção e simulação	59
5.2	Análise de resultados	61
5.3	Níveis de pressão sonora.....	62
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	64
6.1	Considerações finais	64
6.2	Trabalhos futuros	66
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Evolução da P_T em função do tempo em qualquer ponto do espaço. (Isbert, 1998)	5
Figura 2.2 - Oscilações na frequência 1 e 10 Hz. (Isbert, 1998)	5
Figura 2.3 - Relação entre pressão sonora e níveis de pressão sonora (Tadeu et al, 2007)	6
Figura 2.4 - Nível de pressão sonora equivalente (Tadeu et al, 2007)	7
Figura 2.5 - Tempo de reverberação (Mateus, 2009)	8
Figura 2.6 - Proposta de ábaco e equação da reta (Mateus et al, 2012)	9
Figura 2.7 - Nível do ruído ambiente em função do V/N e T (Rindel, 2018)	11
Figura 2.8 - Distâncias de comunicação em refeitórios escolares (Rindel, 2018)	12
Figura 2.9 - Valor de %ALCons através de T_r e L_D-L_R (Isbert, 2008)	15
Figura 2.10 - Correlação entre %ALCons e STI/RASTI (Isbert, 2008)	16
Figura 2.11 – Esquema da propagação som em espaços fechados	17
Figura 2.12 - Reflectograma associado a cada som (Isbert, 1998)	20
Figura 2.13 - Planta da Cantina (Marsico et al, 2008)	22
Figura 2.14 - Esquemas da solução a) e b) (Marsico et al, 2008)	23
Figura 3.1 – Localização das escolas (Google Maps)	24
Figura 3.2 – Planta de projeto do refeitório da EB1 da Lousã	25
Figura 3.3 – Mobiliário existente no refeitório da EB1 da Lousã	26
Figura 3.4 – Planta refeitório EB2 da Lousã	27
Figura 3.5 – Refeitório EB2 da Lousã	27
Figura 3.6 – Planta do refeitório da EB/JI Santa Rita	28
Figura 3.7 – Refeitório da EB/JI Santa Rita	29
Figura 3.8 – Gráfico dos valores médio de T_{20} dos três refeitórios	31
Figura 3.9 – Níveis de pressão sonora ao longo do tempo (à esquerda da EB2 da Lousã; à direita da EB/JI Santa Rita)	32
Figura 3.10 – Impacto no nível de ruído ambiente na saúde humana (Ruído no Trabalho, 2009)	35
Figura 4.1 – Perspetivas do modelo do refeitório da EB2 da Lousã	38
Figura 4.2 – Posição de fontes e recetores do modelo	41
Figura 4.3 – Representação gráfica do T_r medido e o intervalo admissível para calibração do modelo	42
Figura 4.4 – Representação gráfica dos valores T_r obtidos na 1ª iteração	43
Figura 4.5 – Comparação resultados medidos D_{50} (500-2000Hz), RASTI, STI vs. resultados obtidos 1ª iteração	44
Figura 4.6 – Representação gráfica dos valores T_r obtidos na 2ª iteração	45
Figura 4.7 – Comparação resultados medidos D_{50} (500-2000Hz), RASTI, STI vs. resultados obtidos 2ª iteração	46
Figura 4.8 – Representação gráfica dos valores T_r obtidos na 3ª iteração	47

Figura 4.9 – Comparação resultados medidos D_{50} (500-2000Hz), RASTI, STI vs. resultados obtidos 3ª iteração.....	48
Figura 5.1 – Esquema construtivo BASWA Phon Base (BASWA).....	50
Figura 5.2 – Resultados obtidos da 1ª intervenção vs. modelo calibrado vs. medição	52
Figura 5.3 – Esquema construtivo teto acústico Knaud Cleaneo (KNAUF).....	53
Figura 5.4 – Resultados obtidos da 2ª intervenção vs. modelo calibrado vs. medição	54
Figura 5.5 – Esquema construtivo Ecophon Master Matrix (à esquerda) (Ecophon Group) e disposição dos painéis no CATT – ACOUSTIC™ (à direita)	55
Figura 5.6 – Resultados obtidos da 3ª intervenção vs. modelo calibrado vs. medição	56
Figura 5.7 – Esquema construtivo Ecophon Hygiene Foodtec Wall (Ecophon Group).....	57
Figura 5.8 - Localização dos painéis Ecophon Hygiene Foodtec Wall da 4ª estratégia de intervenção.....	57
Figura 5.9 – Resultados obtidos da 4ª intervenção vs. modelo calibrado vs. medição	59
Figura 5.10 – Resultados obtidos da 5ª intervenção vs. modelo calibrado vs. medição	61

ÍNDICE DE QUADROS

Tabela 2.1 - Valores da SNR em função do ruído ambiente e distância de comunicação (Rindel, 2018).....	12
Tabela 2.2 - Requisitos acústicos para as diferentes classes (Rindel, 2018).....	13
Tabela 2.3 - Avaliação subjetiva do grau de inteligibilidade (Mateus, 2017).....	16
Tabela 3.1 - Dados do refeitório EB1 da Lousã	26
Tabela 3.2 – Dados do refeitório EB2 da Lousã.....	28
Tabela 3.3 – Dados do refeitório da EB/JI Santa Rita.....	29
Tabela 3.4 – Valores médios de T_{20} dos três refeitórios.....	31
Tabela 3.5 – Valores médios de D_{50} , RASTI e STI no refeitório da EB2 da Lousã.....	32
Tabela 3.6 – Valor médio do nível de pressão sonora na EB2 da Lousã e EB/JI Santa Rita ...	33
Tabela 3.7 – Verificação do cumprimento regulamenta para os tempos de reverberação	33
Tabela 4.1 – Dados geométricos da EB2 da Lousã no programa CATT – ACOUSTIC™	37
Tabela 4.2 – Revestimentos associados às cores do modelo	39
Tabela 4.3 – Coeficientes de absorção α , dos materiais (Beranek, 1996) (Bies e Hansen, 1997) (Mateus, 2017).....	39
Tabela 4.4 – Objetivo da calibração para o tempo de reverberação.....	42
Tabela 4.5 – Tempos de reverberação obtido na 1ª iteração	43
Tabela 4.6 – Valores dos coeficientes de absorção corrigidos para a 2ª iteração.....	45
Tabela 4.7 - Tempos de reverberação obtido na 2ª iteração	45
Tabela 4.8 – Valores dos coeficientes de absorção corrigidos para a 2ª iteração.....	47
Tabela 4.9 - Tempos de reverberação obtido na 3ª iteração	47
Tabela 4.10 – Comparação dos valores de T_r obtidos da 3ª iteração e os medidos.....	48
Tabela 5.1 – Estratégias de intervenção com as respetivas soluções construtivas	50
Tabela 5.2 – Valores dos coeficientes de absorção da 1ª estratégia de intervenção.....	51
Tabela 5.3 – Resultados T_{30} obtidos da 1ª estratégia de intervenção	51
Tabela 5.4 – Resultados obtidos de D_{50} (500-2000Hz), RASTI e STI da 1ª estratégia de intervenção	51
Tabela 5.5 – Valores dos coeficientes de absorção da 2ª estratégia de intervenção.....	53
Tabela 5.6 – Resultados T_{30} obtidos da 2ª estratégia de intervenção	53
Tabela 5.7 – Resultados obtidos de D_{50} (500-2000Hz), RASTI e STI da 2ª estratégia de intervenção.....	53
Tabela 5.8 – Valores dos coeficientes de absorção da 3ª estratégia de intervenção.....	55
Tabela 5.9 – Resultados T_{30} obtidos da 3ª estratégia de intervenção	55
Tabela 5.10 – Resultados obtidos de D_{50} (500-2000Hz), RASTI e STI da 3ª estratégia de intervenção.....	56
Tabela 5.11 – Valores dos coeficientes de absorção da 4ª estratégia de intervenção.....	58
Tabela 5.12 – Resultados T_{30} obtidos da 4ª estratégia de intervenção	58

Tabela 5.13 – Resultados obtidos de D_{50} (500-2000Hz), RASTI e STI da 4ª estratégia de intervenção.....	58
Tabela 5.14 – Resultados T_{30} obtidos da 5ª estratégia de intervenção	60
Tabela 5.15 – Resultados obtidos de D_{50} (500-2000Hz), RASTI e STI da 4ª estratégia de intervenção.....	60
Tabela 5.16 – Resumos dos resultados obtidos das simulações	62

SIMBOLOGIA

%ALCons - Articulation Loss of Consonants

μPa - micropascal

A_p – área de absorção por pessoa

A_{tot} – área de absorção total equivalente

D_{50} – definição da palavra

$D_{50(500-2000\text{Hz})}$ – média de definição da palavra das bandas de oitava 500Hz e 2000Hz

dB – decibel

f – frequência do som

g – média de pessoas por pessoa a falar

Hz - Hertz

KHz – quilo-Hertz

$L_{A_{\text{eq}}}$ – nível de pressão sonora equivalente, ponderado A

L_D – nível de pressão sonora de campo direto

L_{eq} – nível de pressão sonora equivalente

$L_{N,A}$ – nível de ruído ambiente

L_p – nível de pressão sonora

L_R - nível de pressão sonora de campo direto

$L_{S,A,1m}$ – nível de pressão sonora de uma pessoa a falar á distância de 1 metro

L_w – potência fonte sonora

m – coeficiente de atenuação do som no ar

m - metro

m^2 – metro quadrado

ms - milissegundos

N – número de pessoas

P – pressão sonora

P_0 – pressão atmosférica estática

P_a - pascal

P_t – pressão sonora total

Q – fator de directividade de fonte sonora

r - raio

RASTI – Rapid Speech Transmission Index

s - segundo

S_n – Superfície n

SNR – relação Sinal-Ruído

STI – Speech Transmission Index

T ou T_r – tempo de reverberação

T_{20} – tempo de reverberação medido, baseado numa avaliação de 20dB de variação

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

V - volume

α_n – coeficiente de absorção sonora da superfície n

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

ABREVIATURAS

BB93 - Building Bulletin 93 'Acoustic Design of Schools - A Design Guide

CAD - Computer Aided Design

CATT – ACOUSTIC™ – Computer Aided Theatre Technique

CTE DB HR - Documento Básico Protección frente al ruido

EB – Escola Básica

EB/JI – Escola Básica/Jardim de Infância

ISO – International Organization for Standardization

MLS - Maximum Length Sequence

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

1 INTRODUÇÃO

O conforto acústico no interior dos edifícios é uma questão cada vez mais tida em conta na medida em que, é um dos fatores preponderantes na qualidade de vida. Esta temática outrora era um pouco descuidada por parte dos projetistas, não existindo estudos de condicionamento acústico adequados aos espaços. No presente a população cada vez mais prioriza o seu bem-estar resultando assim, num crescimento progressivo da preocupação relativamente ao conforto acústico.

Os espaços de restauração e em particular os refeitórios escolares, são locais propícios à aglomeração de pessoas e conseqüentemente favoráveis à existência de ruído. Tipicamente nestes espaços além dos alunos desfrutarem das suas refeições diárias, aproveitem também para conviver. O ruído existente não resulta apenas da conversação existindo outras fontes sonoras como, por exemplo os aparelhos da cozinha, o manuseamento dos talheres, o arrastar de cadeiras ou mesas, entre outras. Esse ruído não é só incomodativo como poderá ser nocivo perante a exposição prolongada, principalmente nos alunos com eventuais problemas auditivos. Por outro lado, o ruído afeta também a conversação e a inteligibilidade da fala podendo culminar em acidentes devido à dificuldade de comunicação, entre as auxiliares de educação e alunos.

Como já referenciado anteriormente o estudo de condicionamento acústico deverá ser adequado ao espaço, e nesse sentido é necessário ter em conta que os refeitórios escolares são constituídos por objetos e superfícies que influenciam o conforto acústico. O principal requisito acústico a ter em conta neste tipo de espaços é o tempo de reverberação. Este requisito está diretamente relacionado com a capacidade de o local em absorver energia, através das superfícies e recheio existente. Outra questão, prende-se com este tipo de locais derivado à sua finalidade terem de ser constituídos por materiais rígidos que cumpram os requisitos de segurança, higiene e limpeza originando assim, a existência de várias superfícies refletoras influenciando negativamente o tempo de reverberação.

No que respeita a requisitos legais, Portugal é regido pelo Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) aprovado pelo Decreto Lei nº 129/2002 posteriormente alterado pelo Decreto Lei nº 96/2008. Neste regulamento são exigidos valores limites máximos dos tempos de reverberação para a este tipo de espaços, mas por outro lado não existe regulamentação para os limites de exposição ao ruído. Existe apenas o Decreto-Lei nº 182/2006

referente à exposição de ruído laboral, que neste caso é destinado unicamente às auxiliares de educação.

Neste sentido foi proposto o estudo de três refeitórios escolares pertencentes as escolas do Município da Lousã, de modo a perceber as condições atuais do condicionamento acústico. A análise foi feita através da realização de medições *in-situ* de níveis de ruído, tempos de reverberação e parâmetros associados à inteligibilidade da palavra. Com recurso a um software informático foi possível fazer a modelação do caso de estudo mais relevante, permitindo o estudo de estratégias de reabilitação acústica aplicáveis a refeitórios escolares. Além da reabilitação acústica, que consiste na correção acústica dos espaços já construídos ajustando-os às funcionalidades a que se destinam, as soluções apresentadas podem servir de referência em projetos de novas escolas e no limite poderão estender-se a espaços de restauração, em geral.

2 Conceitos gerais de acústica

2.1 Introdução

Em refeitórios escolares ou em espaços semelhantes onde seja favorável o agrupamento de pessoas é natural a existência de ruído. Dependendo das características do condicionamento acústico desses locais e dos níveis de ruído existentes, o ambiente acústico poderá provocar incómodo e por vezes ser lesivo para a saúde. Apesar de, a exposição ao ruído nesses espaços não ser por períodos de longa duração, tal como acontece em ambientes de trabalho, existe a probabilidade de efeitos para a saúde humana. Existem grupos mais vulneráveis nomeadamente, os alunos, os idosos e pessoas com deficientes capacidades auditivas. (WHO, 1999)

Segundo a Agência Europeia para a Segurança e a Saúde no Trabalho (2005), os efeitos do ruído podem originar problemas na saúde. A exposição ao ruído deteriora as células existentes no interior do ouvido podendo levar à perda de audição, mas também tem efeitos fisiológicos ligados à parte cardiovascular que está associado ao surgimento de *stress* e agressividade. Por outro lado, poderá ocorrer acidentes de trabalho devido à dificuldade de comunicação que neste caso, será entre as auxiliares de educação e alunos.

Das várias fontes presentes nos refeitórios escolares, a principal fonte geradora de ruído são os alunos. De modo a perceber as características vocais de alunos pré-escolares foi realizado um estudo (Cappellari e Cielo, 2008), com o intuito de avaliar a voz das mesmas. Esta análise possibilitou constatar que a voz dos alunos consoante o aumento da idade e o seu crescimento, a frequência fundamental da voz diminuía aproximando-se dos sons mais graves. Uma vez mais constata-se a necessidade do estudo de condicionamento acústico, de acordo com o ruído ambiente existente.

Pinho et al. (2014) fez a avaliação do ruído em refeitórios escolares no âmbito do projeto QUAMIS – Qualidade do ambiente interior em salas de aula. O projeto na sua generalidade teve como objetivo o estudo das condições acústicas em diversos espaços das escolas, mas este artigo citado focou-se exclusivamente na problemática dos refeitórios. Este foco é motivado por não existir regulamentação para os valores limites máximos de exposição nos refeitórios, existindo apenas imposição para o tempo de reverberação. Consequência disso é a inexistência de controlo nestes espaços, algo antagónico dado que nos mesmos existem várias fontes sonoras.

Assim, foram realizadas medições de modo a determinar os tempos de reverberação e os níveis de pressão sonora contínuos equivalentes, ponderados A, L_{Aeq} durante todo o período das refeições e para períodos de 15min. A amostra contemplou seis refeitórios escolares diferentes entre si devido ao ano de construção dos mesmos estar entre os anos 1968 e 2011.

Após a caracterização dos espaços e realizadas as medições, concluiu-se que metade dos refeitórios não cumpriam os limites regulamentares para os tempos de reverberação sendo que, dois deles apresentaram valores da ordem de grandeza cerca do dobro desse limite. Relativamente aos níveis de pressão sonora o estudo permitiu constatar que os alunos durante as suas refeições, estão sujeitos a níveis de pressão sonora equivalente na ordem dos 80 dB(A). Existe ainda casos de refeitórios com alunos da pré-primária e 1º ciclo em que os níveis de pressão sonora equivalentes de 15min, foram superiores a 85 dB(A). Outros aspetos a retirar deste estudo são alusivos à relação do número de alunos presentes, com os níveis de pressão sonora medidos. Verifica-se que as crianças mais novas tipicamente na faixa etária entre os 6 e os 12 anos, são as mais ruidosas e as que permanecem mais tempo naquele espaço. Tendo em conta estes aspetos os autores sugerem que haja uma verificação *in-situ* das condições acústicas dos refeitórios existentes, analisando o cumprimento dos requisitos regulamentares e posterior implementação de medidas de correção acústica.

Como referido anteriormente, além dos refeitórios escolares destinados a alunos mais novos esta problemática estende-se também a outros espaços de refeição nomeadamente, em cantinas de universidades onde o público frequentador pertence a uma faixa etária adulta. Um estudo realizado na cantina pertencente à Faculdade de Engenharia Civil de Bratislava, permitiu avaliar as condições acústicas desse espaço.(Zelem et al., 2015) Foram medidos os níveis de ruído durante as refeições possibilitando relacioná-los com o tempo de permanência e o número de pessoas presentes. Dos resultados obtidos os autores concluíram que os níveis de pressão sonora na sua generalidade não ultrapassavam os 70 dB, sendo um resultado aceitável para este tipo de espaços. Foi utilizado o modelo de previsão estabelecido por Rindel para determinar o número de pessoas que falam na cantina permitindo assim, constatar que entre uma em três e uma em quatro pessoas falam ao mesmo tempo. Relativamente aos tempos de reverberação, os mesmos foram medidos chegando a valores inferiores a 2s nas baixas frequências e superiores 2s nas médias frequências (500 a 2000Hz). Este resultado deveu-se às características dos revestimentos daquele espaço, com o coeficiente de absorção baixo. Segundo relatos descritos no estudo, as auxiliares de educação alegam desconforto face ao ruído que segundo os autores, deve-se ao valor dos tempos de reverberação. Este desconforto poderá ser resolvido adicionando aos espaços soluções construtivas com características de absorção.

2.2 Parâmetros acústicos mais relevantes

2.2.1 Conceitos básicos

Pode-se definir som como uma vibração mecânica (onda) que se propaga através de um meio elástico e denso (geralmente ar), capaz de gerar sensação auditiva. Este som é gerado por uma fonte sonora quando a mesma entra em vibração transmitindo-a às partículas de ar adjacentes e subsequentemente às anexas a estas. Esta transmissão faz com que as partículas oscilem do seu ponto de equilíbrio, sendo este movimento denominado de propagação da onda sonora. Quando as oscilações são feitas na direção da propagação da onda sonora designam-se ondas sonoras longitudinais e caso sejam transversais é intitulada de ondas eletromagnéticas criando assim, um campo sonoro. A forma comum de quantificar a magnitude deste campo sonoro é através da pressão sonora. A pressão sonora total P_T (N/m^2 ou Pa) conforme demonstrada na figura 2.1 é dada pela soma da pressão atmosférica estática P_0 (10^5 Pa) e a pressão sonora associada à onda sonora (P). (Isbert, 1998)

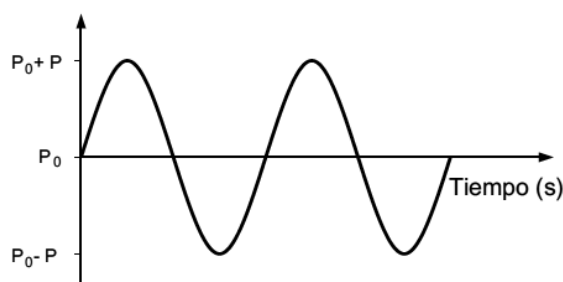


Figura 2.1 - Evolução da P_T em função do tempo em qualquer ponto do espaço. (Isbert, 1998)

O número de oscilações por segundo da pressão sonora (P) é designada por frequência do som (f) e normalmente é medida em Hertz (Hz). Na figura 2.2 está representado o número de oscilações em diferentes frequências. (Isbert, 1998)

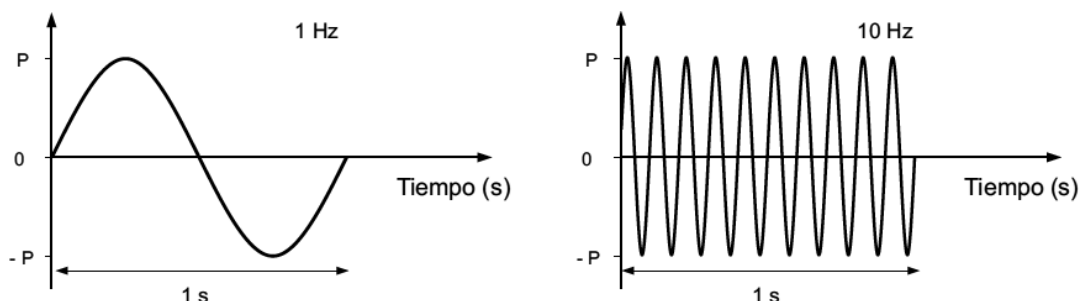


Figura 2.2 - Oscilações na frequência 1 e 10 Hz. (Isbert, 1998)

A gama de frequências audíveis pelo ouvido humano situa-se entre os 20 Hz e os 20 kHz, correspondente a sons graves e sons agudos respetivamente. A resposta do ouvido humano às frequências não é linear, sendo a sensibilidade máxima respeitante à gama de frequências entre os 3,5 kHz e 4 kHz, diminuindo nas altas frequências e nas baixas frequências, essa diminuição é mais acentuada.

No que respeita à resposta do ouvido humano à energia sonora o mesmo geralmente capta sons para uma gama de pressões sonoras audíveis entre os 20µPa e 20Pa, correspondendo ao limiar da audição e limiar da dor respetivamente. Aliando a dificuldade de adotar uma escala linear para esta gama de pressões sonoras, que levaria a resultados com muitas casas decimais e dado que o ouvido humano responde aos estímulos sonoros de uma forma não linear aproximando-se da escala logarítmica, é conveniente o uso desta mesma escala para representar a pressão sonora. Esta escala logarítmica correspondente à relação entre os quadrados da pressão medida e de referência (limiar da audição) que multiplicada por 10 resulta, no nível de pressão sonora L_p , dada na grandeza decibel (dB) conforme equação 1.

$$L_p = 10 \cdot \log\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \text{ (dB)} \quad (1)$$

Em que p corresponde à pressão sonora e p_0 à pressão de referência do limiar da audição, resultando assim numa escala de níveis de pressão sonora entre os 0 dB e 120 dB.

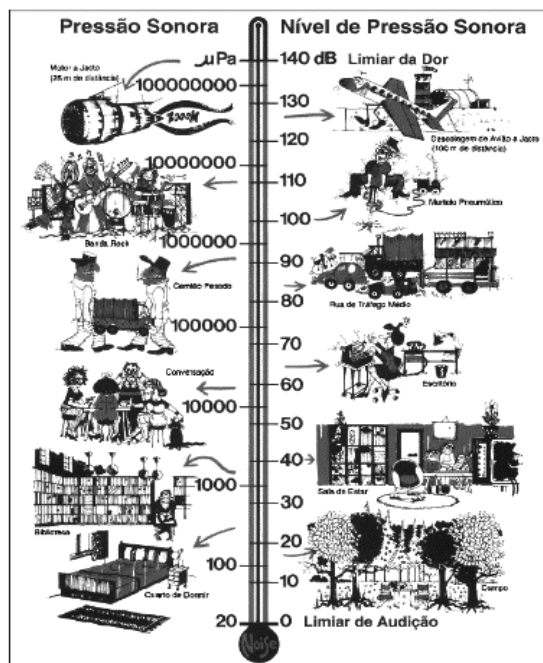


Figura 2.3 - Relação entre pressão sonora e níveis de pressão sonora (Tadeu et al, 2007)

O som numa situação normal é variável ao longo do tempo e nesse sentido, utiliza-se um parâmetro denominado de nível de pressão sonora equivalente L_{eq} (figura 2.4). Este parâmetro corresponde a um som com a mesma energia sonora e amplitude constante durante o mesmo intervalo de tempo em que o som é transmitido. O nível de pressão sonora equivalente é dado pela fórmula:

$$L_{eq} = 10 \log\left(\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0}\right)^2 dt\right) \quad (2)$$

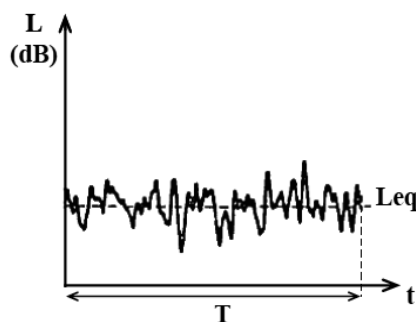


Figura 2.4 - Nível de pressão sonora equivalente (Tadeu et al, 2007)

Onde T representa o período de medição, $p(t)$ a pressão instantânea e p_0 a pressão de referência do limiar da audição. (Tadeu et al, 2007)

Como já referenciado anteriormente, o ouvido humano não responde da mesma maneira à gama de frequências e por esse motivo na medição do som utiliza-se a curva de ponderação A. Esta curva de ponderação permite que o som medido corresponda à resposta do ouvido humano, sendo expresso em dB(A). (Isbert, 1998)

2.2.2 Tempo de reverberação

Quando se pretende qualificar acusticamente espaços fechados utiliza-se o tempo de reverberação, como parâmetro que permite a caracterização desse mesmo espaço. Entenda-se como tempo de reverberação T ou T_r , o tempo para cada frequência que após a interrupção de uma fonte sonora o nível sonoro decaia 60 dB (figura 2.5). Dada a dificuldade de conseguir obter o valor desse decaimento porque nem sempre o ruído de fundo permite ter esse intervalo, opta-se pelo decaimento por exemplo, de 20 dB extrapolando-se depois para os 60 dB.

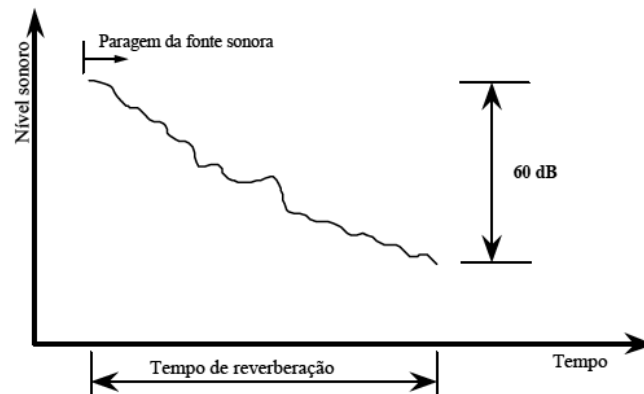


Figura 2.5 - Tempo de reverberação (Mateus, 2009)

A reverberação de um espaço está diretamente relacionada com a capacidade de absorção do mesmo e geralmente o valor T_r diminui aquando do aumento da frequência devido à absorção do ar e os revestimentos das superfícies. Como existe esta variação consoante a frequência é utilizado um valor médio T_r nos valores recomendados. Este é obtido através da média aritmética dos tempos de reverberação nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500, 1000 e 2000Hz. Estes valores recomendados variam consoante o propósito do espaço como, por exemplo se o propósito é a boa inteligibilidade da palavra interessa ter baixos valores de T_r , mas caso sejam espaços com intuito de concertos já interessa valores superiores.

Dos vários modelos teóricos para o cálculo do tempo de reverberação destaca-se a fórmula simplificada de Sabine, como principal referência entre os modelos que é dada por:

$$T_r = \frac{0.161V}{A_{tot} + 4mV} \quad (3)$$

em que, V corresponde ao volume do espaço (m^3), A_{tot} é a área total de absorção do espaço (m^2) e $4mV$ é a área de absorção sonora do ar (m^2).

A área de absorção sonora do ar geralmente só tem influência em espaços de grande volume em que, a humidade relativa do mesmo seja baixa e as frequências do som sejam superiores a 2000Hz. A área total de absorção do espaço (equação 4) é dada pelo somatório das superfícies (S_n) multiplicada pelo seu coeficiente de absorção α_n . Este coeficiente de absorção corresponde à diferença entre a energia absorvida e a incidente, variando entre 0 e 1 para materiais refletos e absorventes respetivamente.

$$A_{tot} = \sum \alpha_n S_n \quad (4)$$

Apesar de, a fórmula de Sabine ser a mais usada a mesma tem algumas condicionantes nomeadamente, o espaço deverá ter uma geometria regular, a energia do som deve propagar-se da mesma maneira em todas as direções e o coeficiente de absorção médio deverá ser inferior a 0.4, ou seja, resumindo destina-se a espaços com pouca absorção. (Isbert, 1998)

Com este propósito Mateus et al. (2012) realizou um estudo em que sugere a correção dos coeficientes de absorção, com o intuito de aplicar a fórmula de Sabine a espaços com elevada absorção. Este estudo teve dois tipos de abordagens que culminaram num ábaco (figura 2.6) de correção dos valores do coeficiente de absorção fornecidos pelos fabricantes permitindo assim, a aplicação da fórmula de Sabine em fase de projeto e consequente comparação com os requisitos regulamentares exigidos. O primeiro tipo de abordagem consistiu na comparação entre os tempos de reverberação obtidos através de ensaios experimentais e os obtidos pela fórmula de Sabine. A segunda abordagem foi mais teórica recorrendo ao programa de cálculo automático CATT – AcousticTM e feita a comparação com os resultados obtidos com a fórmula de Sabine. Os espaços utilizados foram salas de aulas correntes com várias propostas de revestimentos e ainda criada uma sala fictícia irregular de modo que não existissem paralelismos.

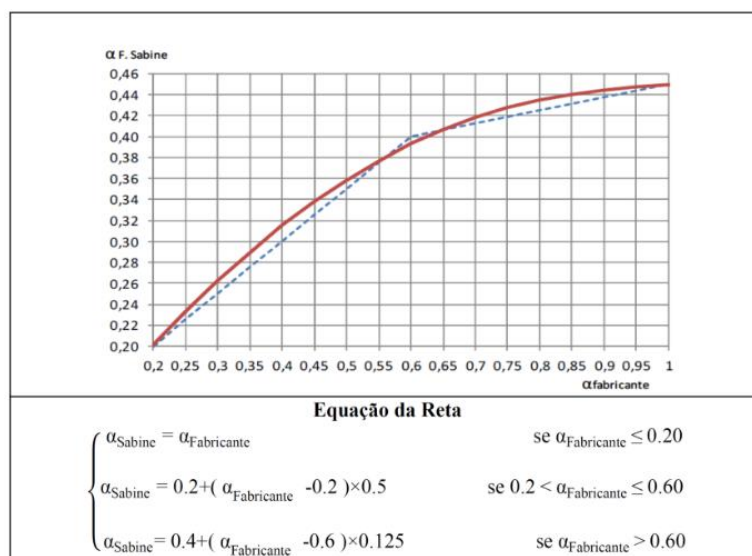


Figura 2.6 - Proposta de ábaco e equação da reta (Mateus et al., 2012)

Foi possível constatar quando o coeficiente de absorção médio é superior a 0.2 os resultados obtidos através da fórmula de Sabine, conduzem a erros pelo lado da insegurança. Com esta proposta de ábaco os resultados obtidos passam a estar pelo lado da segurança e até próximos dos reais, mas apenas para espaços inferiores a 500 m³.

Reboredo (2008) no âmbito da dissertação para obtenção de grau Mestre em Engenharia Civil, estudou o comportamento acústico de locais de restauração, nomeadamente o Campus da Universidade de Aveiro. Com o intuito de avaliar o comportamento acústico de três espaços existentes nessa instituição foi obtido o tempo de reverberação de cada um, através de ensaios experimentais e da fórmula de Sabine. Como seria previsível os resultados obtidos foram divergentes, sendo os resultados via modelo teórico inferiores aos reais, estando assim pelo lado da insegurança. Num dos espaços estudados a diferença do tempo de reverberação previsível para o real foi superior a 1s e nos restantes o valor ficou próximo, mas sempre inferior como já mencionado anteriormente. Segundo o autor existiu uma dificuldade na obtenção de coeficientes de absorção sonora dos materiais usados como revestimento, mas no local com construção mais recente foi possível obter os mesmos e assim, o tempo de reverberação foi mais próximo.

Apesar deste exemplo descrito não corresponder à fase de projeto, poder-se-á retirar deste estudo que para o local de construção mais recente, onde se obteve os coeficientes de absorção sonora, caso tivesse feita a correção dos valores superiores a 0,2 o tempo de reverberação aumentaria e consequentemente estaria do lado da segurança.

2.2.3 Relação Sinal/Ruído

Todos os espaços destinados à restauração têm em comum serem locais de aglomeração de pessoas em que o ruído advém principalmente da conversação. É notório neste tipo de espaços quando o condicionamento acústico não é adequado, existir dificuldade na comunicação levando à necessidade de as pessoas elevarem a voz, devido ao ruído ambiente. Nesse sentido, Rindel (2018) fez um estudo tendo como base várias variáveis e a comunicação verbal, resultando na sugestão de requisitos mínimos para alguns parâmetros consoante os vários tipos de espaços de restauração. Tendo como base o modelo do próprio autor de previsão do nível de ruído ambiente (equação 5), foi possível perceber que os principais parâmetros que influenciam o ruído são, o tempo de reverberação e a relação volume por pessoa originando assim, um gráfico que relaciona essas três variáveis. Assim à priori é possível saber qual será o nível de ruído ambiente tendo em conta o volume por pessoa e o tempo de reverberação previsto.

$$L_{N,A} = 93 - 20 \log \left(g \left(\frac{0.16V}{N.T} + A_p \right) \right), (dB) \quad (5)$$

Em que, g corresponde à média de pessoas por pessoa a falar, V ao volume do espaço (m^3), N o número de pessoas e A_p à área de absorção por pessoa.

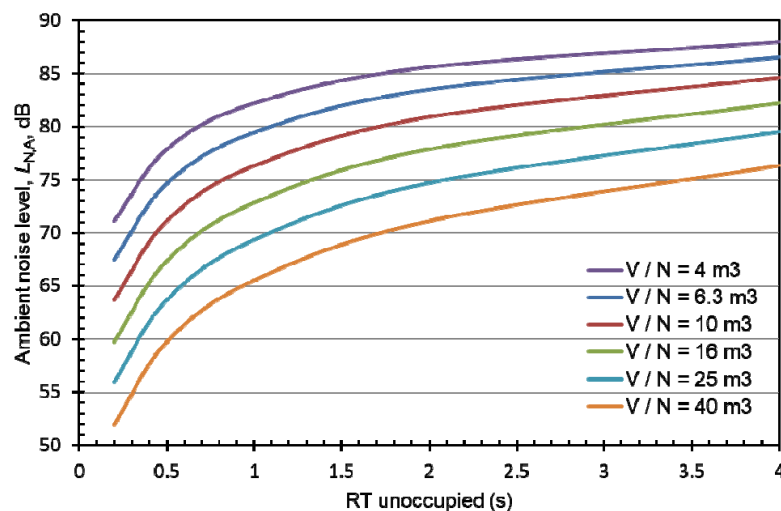


Figura 2.7 - Nível do ruído ambiente em função do V/N e T (Rindel, 2018)

Outro parâmetro que permite a avaliação acústica é a qualidade da comunicação verbal, que está conectada com a relação sinal-ruído (SNR). Esta relação consiste na diferença do nível da fala a uma distância r e o nível de ruído ambiente (equação 6), sendo aplicável a níveis de ruído ambiente nos intervalos de 45 a 85 dB(A) ou níveis de fala entre 55 e os 75 dB(A) significando que, a SNR varia entre -10 dB e 10 dB.

$$SNR = L_{S,A,1m} - L_{N,A} = 10 \log \left(\frac{QAg}{16\pi r^2 N} \right) \approx 10 \log \left(\frac{Qg}{100\pi r^2} \times \frac{V}{NT} \right), (dB) \quad (6)$$

Em que, Q corresponde à diretividade de uma pessoa que fala assumindo o valor de 2 considerando na frente da boca.

Através desta relação foi obtido um quadro com a escala dos níveis da qualidade da comunicação verbal, variando do nível “Muito mau” até ao “Muito bom”. Usando esta escala o autor chegou à conclusão que a $SNR = -3$ dB é o requisito mínimo, considerando pessoas com audição normal. Em conjunto com outro estudo de Rindel (2012) foi obtido uma escala para os níveis da fala a uma distância $r=1$ m, concluindo-se que o nível de fala mínimo satisfatório seria 68 dB(A). Ora isto significa que para $SNR = -3$ dB, o nível de ruído ambiente seria da ordem dos 71 dB(A). Usando a equação (6) consegue-se estimar o número máximo pessoas para esse mesmo nível de ruído, considerando $g=3,5$. A capacidade acústica é dada pela equação (7):

$$N_{m\acute{a}x} = \frac{V}{20T} \quad (7)$$

A distância de comunicação influencia a SNR, ou seja, quanto mais curta a distância entre o comunicador e o ouvinte, mais alto será o valor da SNR. Assim o formato das mesas e disposição das pessoas em espaços de restauração, está diretamente relacionado com a distância de comunicação. Para entender a influência o autor elaborou uma tabela com a relação da distância e a SNR.

Tabela 2.1 - Valores da SNR em função do ruído ambiente e distância de comunicação (Rindel, 2018)

Distance <i>r</i> , m	SNR (dB) - quality of verbal communication						
	Ambient noise level, $L_{N,A}$, dB						
	53	59	65	71	77	83	89
0.35	15	12	9	6	3	0	-3
0.5	12	9	6	3	0	-3	-6
0.7	9	6	3	0	-3	-6	-9
1.0	6	3	0	-3	-6	-9	-12
1.4	3	0	-3	-6	-9	-12	-15
2.0	0	-3	-6	-9	-12	-15	-18

Tipicamente em refeitórios escolares são usadas mesas longas em que, as distâncias variam entre 1m e 0.5m conforme figura seguinte.

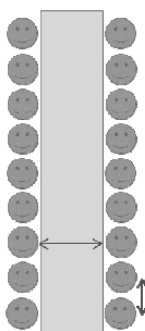


Figura 2.8 - Distâncias de comunicação em refeitórios escolares (Rindel, 2018)

Analisando a tabela e tendo em conta o tipo de mesas usadas em refeitórios, o nível de ruído ambiente máximo para $r=1m$ seria 71 dB e para $r=0.5m$ seria de 83 dB.

Por outro lado, considerando a distância $r=1\text{m}$ e através da equação (7), a relação $\frac{V}{NT}$ para uma taxa de ocupação de 100% seria igual a 20. Segundo o autor, de modo a previsão ser mais realista, considera que a taxa de ocupação normalmente andarás na casa dos 80% e assim é possível determinar a exigências do tempo de reverberação.

$$T \leq \frac{1}{0.80 \times 20} \cdot \frac{V}{N} \cong 0.063 \cdot \frac{V}{N}, (s) \quad (8)$$

Ou seja, o requisito para o tempo de reverberação depende do volume por pessoa como já foi referenciado anteriormente, por isso é favorável que a ocupação não seja elevada. Alguns países dividem em quatro classes (A, B, C e D) a qualidade do som nos edifícios, sendo a classe A a melhor, a classe C como referência de requisito mínimo e D para edifícios antigos. O autor usando essas classes sugere um valor da relação $\frac{V}{NT}$ para cada uma delas e assim, elabora uma tabela com requisitos acústicos em espaços de restauração, considerando a SNR a uma distância de 1m.

Tabela 2.2 - Requisitos acústicos para as diferentes classes (Rindel, 2018)

Volume per person / Reverberation time (m ³ /s)	Sound class			
	Class A	Class B	Class C	Class D
	40	25	16	10
Occupancy	SNR (dB) in 1 m distance			
100 %	0	-2	-4	-6
80 %	1	-1	-3	-5
63 %	2	0	-2	-4
50 %	3	1	-1	-3
40 %	4	2	0	-2
32 %	5	3	1	-1
25 %	6	4	2	0

Ele conclui que a classe A pode ser destinada aos melhores restaurantes, a classe B para sala de festas, a classe C para locais onde as pessoas comem de pé e a classe D para cantinas. Isto significa que para a $SNR=-3$ um refeitório escolar teria de estar a 50% da sua capacidade máxima de ocupação. Também é possível retirar deste estudo que nem todos os espaços destinados à restauração têm as mesmas exigências acústicas.

Através do Programa de modernização de Escolas do Ensino Secundário em que, o intuito seria intervir várias escolas de modo a dotá-las de padrões aceitáveis de qualidade, foi realizado um estudo por Alarcão et al. (2008) com a intenção de perceber as condições acústicas das mesmas e assim elaborar um guia de boas práticas. O estudo centrou-se em todos os espaços de aprendizagem sendo que, para os refeitórios foram medidos os tempos de reverberação na

qual resultaram valores superiores aos desejados. Foi então sugerido um valor máximo para tempo de reverberação na média de bandas de oitava centradas nas frequências entre os 500 e 2000 Hz que são fundamentais para a fala, devendo o valor ser inferior a 1s. Nesta mesma linha é sugerido pela Organização Mundial de Saúde (1999) o mesmo valor limite para o tempo de reverberação. Para a relação sinal-ruído são inumerados vários fatores que influenciam o valor dessa relação, sendo o nível ruído de fundo um dos fatores que deverá ser limitado e no caso dos refeitórios escolares, não deverá exceder os 45 dB(A).

2.2.4 Inteligibilidade da palavra: %ALCons, STI/Rasti e D_{50}

A inteligibilidade da palavra corresponde à quantidade de palavras (expressa em percentagem ou numa escala de 0 a 1) que são perceptíveis na totalidade dos sons emitidos. Por outro lado, a compreensão de mensagem oral tem como principal fator de dependência a correta perceção das consoantes e o eco existente no espaço.

Nesse sentido, Puetz realizou um estudo que permitiu determinar uma fórmula para o cálculo da inteligibilidade. Esta investigação foi o culminar de dois trabalhos distintos sendo que, o primeiro consistiu na emissão de “logatoms” (palavras sem sentido, formadas por consoante-vogal-consoante) em vários espaços onde estavam presentes pessoas que anotavam o que ouviam. Através deste teste, Puetz deu origem à denominada %ALCons (“Articulation Loss of Consonants”) que significa a percentagem de consoantes perceptíveis, ou seja, em termos práticos se as pessoas conseguiram ouvir 85% dos “logatoms” quer dizer que a perda de informação %ALCons seria de 15%. O segundo trabalho consistiu em descobrir uma lei matemática que a partir dos parâmetros acústicos referentes ao espaço, permitisse o cálculo de %ALCons em qualquer ponto do mesmo sem ter de realizar ensaios experimentais e assim em fase de projeto seria possível prever a inteligibilidade da palavra. Assim Puetz chegou à conclusão de que o valor de %ALCons em qualquer ponto do espaço, poderia ser estipulado através do conhecimento do tempo de reverberação e a diferença entre o nível de pressão sonora do campo direto L_D e o campo reverberante L_R nesse ponto.

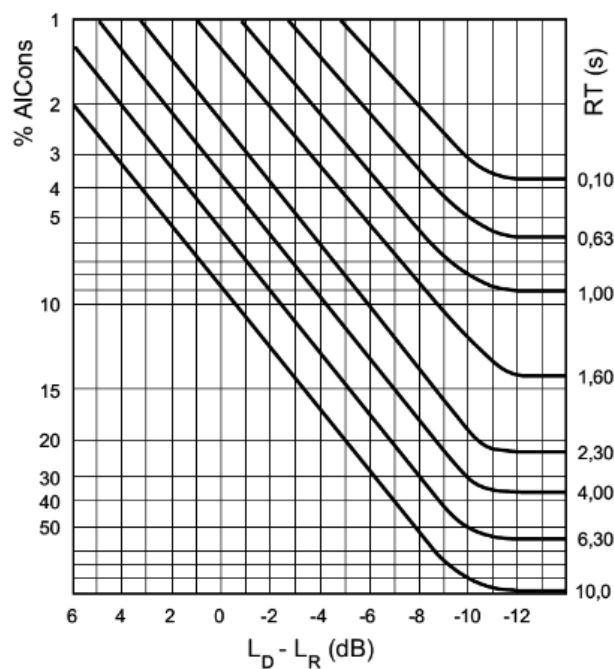


Figura 2.9 - Valor de %ALCons através de T_r e L_D-L_R (Isbert, 2008)

O cálculo de $L_D - L_R$ é dado pela expressão 9:

$$L_D - L_R = 10 \log \left(\frac{QR}{r^2} \right) - 17 \text{ (dB)} \quad (9)$$

Onde Q é o fator de diretividade da fonte sonora na direção considerada (Q=2 no caso da voz humana considerando a direção frontal do orador), R corresponde à constante da sala (m^2) e r diz respeito à distância do ponto considerado, à fonte sonora (m).

O cálculo de %ALCons está diretamente dependente do conhecimento do coeficiente médio de absorção da superfície total e do volume do espaço. Devido ao fato, da frequência de 2 kHz ser a que mais contribui para a inteligibilidade da palavra, o cálculo do coeficiente de absorção médio será nessa banda de frequência. Outra razão que pode influenciar a perda de inteligibilidade da palavra, prende-se pela presença de ruído de fundo existente no espaço, mas que poderá ser desprezável quando a diferença para o nível sonoro medido for menor que 12 dB.

De forma experimental pode-se determinar outros parâmetros que permitem quantificar a inteligibilidade da palavra, nomeadamente o mais completo designado por STI (“Speech Transmission Index”) em que o valor, tal como mencionado no início do capítulo oscila numa

escala entre 0 (inteligibilidade nula) e 1 (inteligibilidade total). Este valor poderá ser também, apresentado em percentagem. Outro parâmetro mais simplificado e usualmente mais usado que o STI devido à sua rapidez de cálculo é o RASTI (“Rapid Speech Transmission Index”). Também tem sido demonstrada uma boa correlação entre a %ALCons e STI/RASTI, como pode ser observado na figura 2.10 e tabela 2.3.

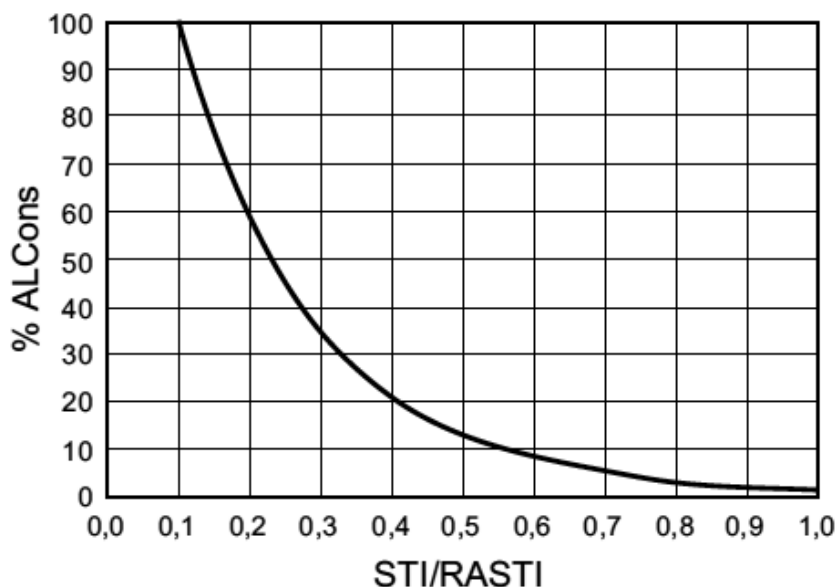


Figura 2.10 - Correlação entre %ALCons e STI/RASTI (Isbert, 2008)

Tabela 2.3 - Avaliação subjetiva do grau de inteligibilidade (Mateus, 2017)

%ALCons	STI/RASTI	Avaliação subjetiva
1.4% - 0%	0.88 - 1	Excelente
4.8% - 1.6%	0.66 - 0.86	Boa
11.4% - 5.3%	0.50 - 0.64	Aceitável
24.2% - 12%	0.36 - 0.49	Pobre
46.5% - 27%	0.24 - 0.34	Má

No que respeita ao parâmetro de definição D_{50} , o mesmo corresponde à razão entre a energia auferida nos primeiros 50 ms e a energia total. Tal como nos índices anteriores este parâmetro

poderá ser apresentado numa escala de 0 a 1 ou em percentagem sendo que, quanto maior for o seu valor maior será a inteligibilidade da palavra. Na generalidade este valor deverá apresentar valores superiores a 50%. A determinação deste parâmetro é feita através de ensaios experimentais, recorrendo a equipamento apropriado que permita a sua medição. (Mateus, 2009)

No início deste subcapítulo foi mencionado que os principais fatores de dependência para compreensão da mensagem oral era, a correta percepção das consoantes e o eco existente no espaço. O eco é fruto da capacidade de resposta do ouvido humano que em média consegue distinguir dois sons caso, eles sejam intervalados de valor nunca inferior a 50 ms, ou seja, após o ouvido humano distinguir do som direto, o som refletido terá de surgir pelos menos a 50ms mais tarde. Isto determina que a distância percorrida durante esse intervalo de tempo será 17m, conforme é demonstrado na equação seguinte.

$$v = \frac{d}{t} \Leftrightarrow d = v \times t \Leftrightarrow d = 340 \times 50E - 3 = 17m \quad (10)$$

Em que v , corresponde à velocidade do som (m/s) e t o intervalo de tempo mínimo (s).

A existência de eco no interior de um espaço fechado tem grande influência no que respeita à inteligibilidade da palavra e sons. Este fenómeno acontece sempre na existência de superfícies refletoras e quando a distância percorrida pelas reflexões tardias, seja superior a 17 m relativamente à distância do som direto entre a fonte e o recetor.

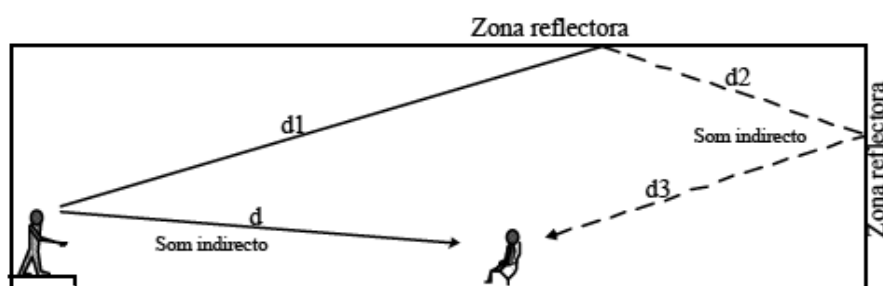


Figura 2.11 – Esquema da propagação som em espaços fechados

Recorrendo à esquemática da figura 2.11 é possível ver a forma como o som é propagado num espaço fechado sendo que, a existência de eco ocorre quando o somatório das distâncias d_1 , d_2

e d_3 percorridas num espaço tridimensional, seja maior que a soma da distância $d + 17m$.
(Tadeu et al, 2007)

2.3 Requisitos regulamentares

No que respeita a requisitos acústicos este estudo centra-se nos limites para tempo de reverberação e nos limites dos níveis de ruído ambiente. Assim, de modo a avaliar o comportamento acústico dos edifícios é necessário conhecer a legislação nacional em vigor. Em Portugal, os requisitos regulamentares são regidos pelo Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) inicialmente aprovado pelo Decreto-Lei n.º129/2002 e mais tarde alterado pelo Decreto-Lei n.º 96/2008. No caso dos refeitórios escolares os requisitos acústicos estão dispostos no artigo 7º, referente a “Edifícios escolares, similares, e de investigação”. No presente artigo no seu ponto 1 alínea d) é referido que em locais “considerados mobilados normalmente e sem ocupação” o tempo de reverberação T , “correspondente à média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz”, deve cumprir o exposto no quadro III do anexo presente no RRAE que para refeitórios escolares, deverá satisfazer a seguinte equação:

$$T \leq 0,15V^{\frac{1}{3}} (s) \quad (11)$$

Em que V corresponde ao volume do espaço em m^3

Aliado a esta condição e nesse mesmo artigo no seu ponto 5 alínea d) é descrito que, “O valor obtido para o tempo de reverberação, T , diminuído do fator I no valor de 25 % do limite regulamentar, satisfaça o limite regulamentar.”.

No que respeita aos níveis de ruído ambiente o Regulamento de Requisitos Acústicos em Edifícios não impõe limites pelo que, é considerado uma lacuna não possibilitando comparar valores obtidos experimentalmente com requisitos regulamentares. Por outro lado, os refeitórios não são locais apenas com presença de alunos, mas também de adultos. Os mesmos puderam ser considerados como locais laborais, dada a presença de auxiliares de educação. Segundo o Decreto-Lei n.º 182/2006 respeitante às diretrizes para exposição ao ruído de trabalhadores da Diretiva n.º 2003/10/CE, é decretado que a partir do limite do nível de exposição diária ao ruído cujo valor é 80 dB(A), será necessário medidas preventivas. Dada a inexistência de regulamentação neste estudo este valor será considerado como nível de alerta.

Além da legislação portuguesa é interessante comparar os requisitos de conforto acústico com outros países de modo a perceber a diferença de princípios. Em Espanha, para o tempo de reverberação a legislação é regida pelo Código Técnico de la Edificación, Documento Básico Protección frente al ruido -CTE DB HR. É imposto para “restaurantes y comedores” $T \leq 0,9s$ e tal como a legislação portuguesa, não depende do volume do local nem diferencia refeitórios consoante o tipo de edifícios. Por outro lado, a legislação espanhola só é mais exigente para espaços com volumes superiores a 216 m^3 . Na questão dos níveis de ruído ambiente é regido igualmente pela Diretiva Europeia, não existindo valores limites para exposição de ruído em locais de restauração. Já em Inglaterra, a legislação presente para acústica de escolas é a Building Bulletin 93 'Acoustic Design of Schools - A Design Guide – BB93. Para os tempos de reverberação uma vez mais, tal como em Espanha, a legislação inglesa não se rege pelo volume do espaço decretando que $T \leq 1s$, sendo assim menos exigente.

2.4 Exemplos de estratégias de intervenção e melhoria

Para solucionar o problema do condicionamento acústico é necessário encontrar as melhores soluções construtivas que vão ao encontro do pretendido, mas primeiramente é necessário conhecer o funcionamento da propagação do som em espaços fechados, os tipos de materiais existentes e as suas características.

Em qualquer ponto de um espaço fechado o som de uma fonte sonora chega ao recetor por duas vias distintas: direta e indiretamente. A energia radiada de forma direta é designada por som direto, ou seja, como a fonte sonora e o recetor estivessem em espaço aberto. Neste caso a energia que chega ao recetor apenas está dependente da distância à fonte sonora. Já no que respeita à energia radiada de forma indireta, apelidada de som indireto, a mesma é consequência de reflexões sucessivas derivadas das ondas sonoras que atingem as superfícies dos espaços. A energia que atinge o ouvinte resulta de duas variáveis, nomeadamente o percurso que o feixe de som percorre e das características de absorção sonora dos materiais utilizados como revestimento das superfícies. Naturalmente quanto maior a distância entre a fonte sonora e o recetor e mais absorventes sejam os materiais, menor será a energia referente ao som direto e as reflexões serão diminutas.

Relativamente às reflexões e analisando a evolução temporal do som refletido em qualquer ponto do espaço fechado, constata-se duas zonas de características dispares. A primeira zona corresponde às reflexões que chegam logo após ao som direto, denominadas de “early reflections” enquanto que, a segunda zona diz respeito às reflexões tardias que compõem a cauda reverberante. No entanto a chegada das reflexões é ininterrupta não existindo grandes

variações, mas também é verdade que as primeiras reflexões chegam de uma forma menos contínua que as tardias. Isto deriva da quantidade “n” vezes que o raio sonoro incide sobre as superfícies antes mesmo de atingir o recetor que no caso das primeiras reflexões, anda na ordem $n \leq 3$. Normalmente é estabelecido um limiar temporal para estas reflexões, que se situa nos 100 ms após a chegada do som direto, variando consoante as características do espaço (forma e volume). (Isbert, 1998) De uma forma esquemática é apresentada na figura 2.12 as formas como a energia do som atinge o recetor e o respetivo reflectograma, permitindo observar a evolução temporal do som direto e som indireto, consequência das reflexões divididas nas duas zonas anteriormente descritas.

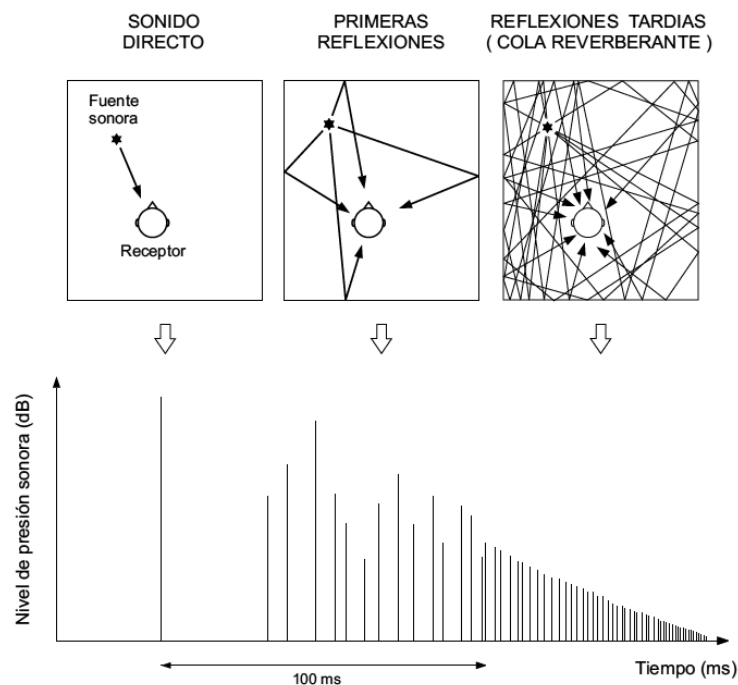


Figura 2.12 - Reflectograma associado a cada som (Isbert, 1998)

Após entender a forma como o som chega ao recetor e definido a forma e volume do espaço é necessário escolher os melhores materiais para revestimento de superfícies, a fim de obter os tempos de reverberação adequados a cada espaço. Esta escolha está relacionada também com o propósito a que o espaço se destinada dado que, para cada caso serão necessárias características próprias dos materiais. Existem três tipos de características de materiais que estabelecem efeitos sobre a energia sonora, nomeadamente: os de absorção do som, os de reflexão de som e difusão do som.

O bom condicionamento acústico de espaços fechados depende da forma como se reduz a energia do som, quer seja, pela propagação pelo ar, quer quando atingem as superfícies. Esta redução é obtida através da absorção sonora de elementos existentes nestes espaços tais como, cadeiras, pessoas, materiais absorventes e/ou absorventes seletivos (ressonadores) colocados estrategicamente em algumas zonas como revestimento, o ar, elementos suscetíveis de vibrações (portas, janelas, divisórias leves) e materiais rígidos não porosos utilizados na construção de paredes e tetos (betão). A absorção da energia do som, devido à incidência sobre os materiais absorventes colocados como revestimentos de superfícies e a sua dependência em função da frequência, varia de material para material. Assim é possível escolher o material absorvente mais adequado consoante as frequências. Esta utilização de materiais absorventes está diretamente relacionada com o objetivo de cumprir certos requisitos tais como, os tempos de reverberação consoante o propósito do espaço, a prevenção e/ou anulação de ecos e a atenuação do campo reverberante em espaços suscetíveis de ruído (restaurantes, fábricas, etc).

Os materiais absorventes têm capacidade de dissipar a energia que incide sobre eles, sendo esta absorção própria de materiais porosos sempre que os poros sejam alcançáveis pelo exterior. Os mesmos geralmente são compostos por substâncias fibrosas ou granulares, sujeitos a um processo de compactação através de prensagem ou tecelagem. Os materiais absorventes existentes no mercado são fabricados através de lã de vidro, lã mineral, espuma de poliuretano e espuma à base de resina de melamina.

Habitualmente é adequado estes materiais serem protegidos, quer seja pela degradação dos mesmos conduzindo à libertação partículas e contaminar o ar do espaço, quer por estarem ao alcance da ação humana podendo danificá-los ou porque os Arquitetos tendem a ocultá-los por questões de estética. Entre as várias soluções com o propósito de proteção dos materiais absorventes, as usualmente utilizadas são:

- Véu acusticamente transparente
 - Superfície microporosa
 - Placa rígida de argamassa porosa baseada em grãos de mármore, pedras naturais ou quartzo pigmentado
 - Aglomerado de madeira fina
 - Aglomerado com magnesita ou cimento
 - Folha de plástico ou papel
 - Pannel perfurado ou ranhurado em madeira, chapa ou gesso cartonado
 - Tijolo perfurado ou entalhado
 - Ripas de madeira
-

Estes materiais absorventes quando colocados sobre superfícies rígidas conduzem a ineficácia da absorção sonora em baixas frequências, no entanto se colocados separados da parede permite uma melhoria. Contudo é conveniente atingir uma boa absorção sonora em baixas frequências que será atingida com materiais absorventes seletivos (ressonadores) que atingem a sua absorção sonora máxima a uma certa frequência, denominada frequência ressonadora que depende das características físicas e geométricas do ressonador. Esta frequência usualmente situa-se abaixo dos 500 Hz. Os ressonadores poderão ser utilizados como complemento aos materiais absorventes ou de forma independente. Os exemplos de ressonadores existentes são habitualmente os seguintes:

- Membrana ou diafragmático
- Cavidade simples (Helmholtz)
- Múltipla cavidade (Helmholtz) baseada em painéis perfurados ou ranhurados
- Múltipla cavidade (Helmholtz) baseada em ripas

Normalmente para a melhoria do condicionamento de espaços a correção acústica é feita com colocação de soluções em tetos e paredes, mas poderá existir casos em que essas soluções não sejam suficientes e será preciso encontrar alternativas.

Um exemplo disso é o estudo realizado no refeitório da Agência Nacional para a Proteção Ambiental localizada em Roma (Marsico et al, 2008), em que foi realizada a avaliação o ambiente acústico daquele espaço (Figura 2.13). Trata-se de um espaço confinado com uma área de 150m² e um volume de 450m³, equipado com 53 mesas que resulta em 220 lugares sentados. A nível de revestimentos de superfícies, o pavimento é revestido a linóleo, o teto é de plástico colocado a 20 cm do teto, as restantes paredes, pilares assim como as mesas existentes são revestidas a material “Fórmica” e existe ainda vãos de sacada envidraçados

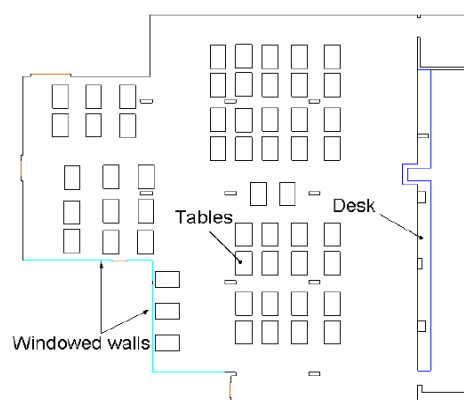


Figura 2.13 - Planta da Cantina (Marsico et al, 2008)

Foram realizados vários ensaios acústicos dentro dos quais, a medição do tempo de reverberação e dos níveis de pressão sonora contínuos equivalentes, ponderados A, $LAeq$ no período mais crítico, onde o número de pessoas é maior. Dos resultados obtidos observou-se que o $LAeq \geq 80 \text{ dB}(A)$ significando que, caso a exposição seja por um curto período não tem efeitos nocivos na saúde, mas mesmo assim torna-se bastante incomodativo. No que respeita ao tempo de reverberação medido, foi observado que nas baixas frequências apresenta bons resultados, consequência do revestimento do pavimento, aumentado nas médias e altas frequências o que prejudica na inteligibilidade da fala. Para melhorar o condicionamento acústico daquele espaço os autores recorreram a um software de simulação acústica permitindo assim, com base na introdução de novas soluções construtivas perceber as melhorias. Foram propostas duas soluções sendo a solução a), a introdução de painéis absorventes entre pilares criando uma espécie de divisórias e a solução b), corresponde à solução anterior com introdução também de painéis absorventes em algumas paredes, conforme indicado na figura 2.14.

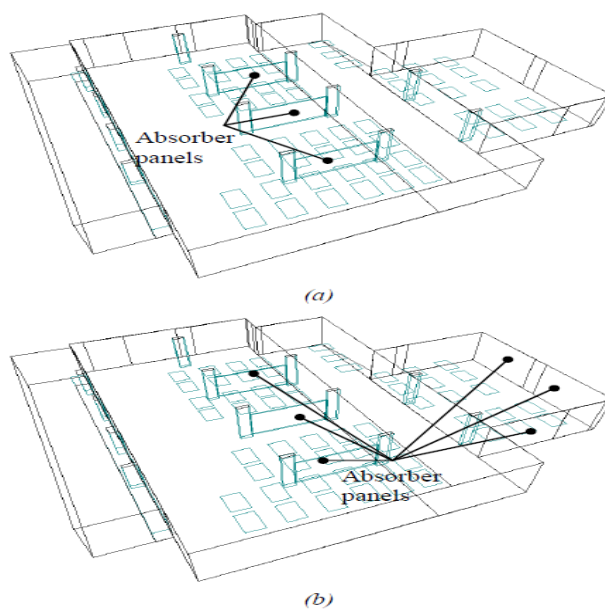


Figura 2.14 - Esquemas da solução a) e b) (Marsico et al, 2008)

Após a simulação com estas duas soluções constatou-se a grande melhoria do desempenho acústico, principalmente adotando a solução b), mas de realçar neste estudo é as soluções construtivas adotadas que permitiram a melhoria do condicionamento acústico e em simultâneo não foi alterado, nem o sistema estrutural nem as paredes existentes. Além disso foi atingindo o objetivo de preservar a usabilidade do espaço sem condicionar a mobilidade dos utilizadores, a iluminação natural e sem diminuir o número de assentos.

3 CASO DE ESTUDO

Como já referenciado os objetos de estudo desta dissertação são três refeitórios pertencentes a escolas do município da Lousã. Estes estabelecimentos estão inseridos no Agrupamento de Escolas da Lousã e foram identificados por parte do município, como sendo os que apresentavam mais queixas por parte dos utilizadores relativamente ao ruído existente, nos respetivos refeitórios. As escolas situadas nas proximidades da vila da Lousã são: a Escola Básica nº 1 da Lousã, Escola Básica nº 2 e Escola Básica/ Jardim de Infância Santa Rita.

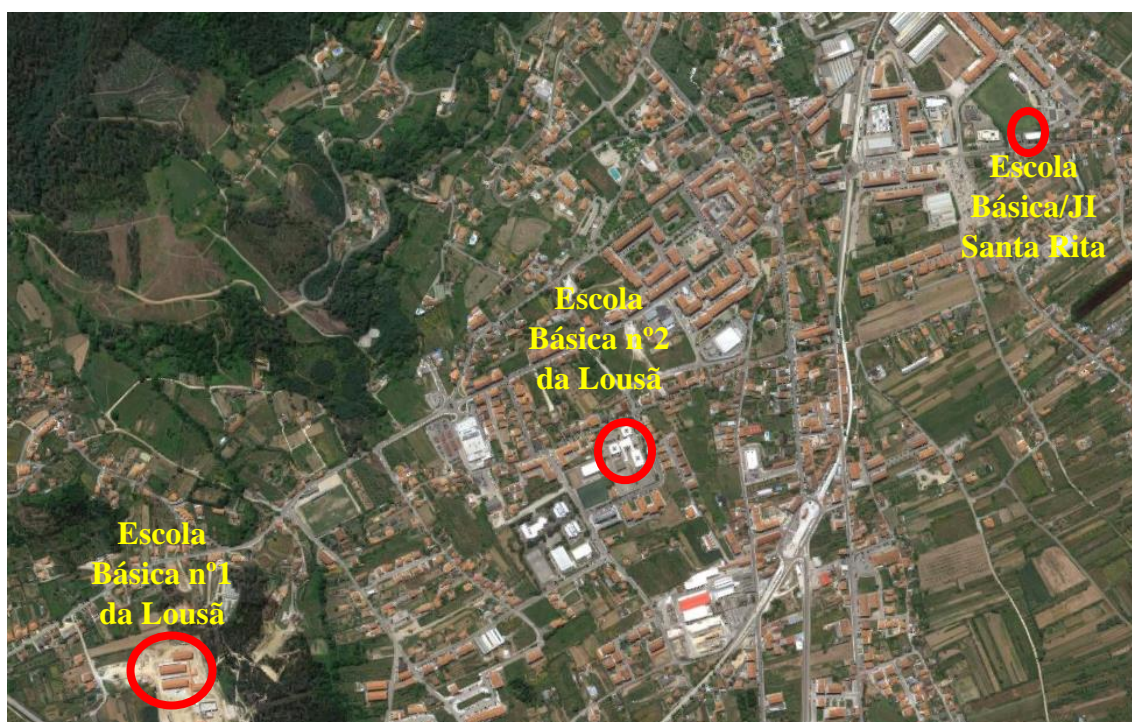


Figura 3.1 – Localização das escolas (Google Maps)

3.1 Caracterização dos refeitórios

Além das plantas e dados relativos aos refeitórios fornecidos por parte do município da Lousã, foram realizadas visitas aos locais não só, para realização dos ensaios experimentais, como para recolher informação, levantamento de medidas e do mobiliário existente.

3.1.1 Refeitório EB1 da Lousã

A escola do ensino básico do 1º, 2º e 3º ciclo, denominada Escola nº1 da Lousã (EB1) foi construída recentemente, mais propriamente no ano de 2015. A mesma é constituída por vários blocos correspondentes aos vários serviços e finalidades. O refeitório da EB1 está inserido no “Bloco D”, sendo este um edifício autónomo de apenas um piso com geometria retangular. A planta do refeitório cedida pelo município da Lousã talvez fosse a de projeto, mas aquando da visita ao local constatou-se que a mesma diferia, aproximando-se mais da planta apresentada na figura 3.2.

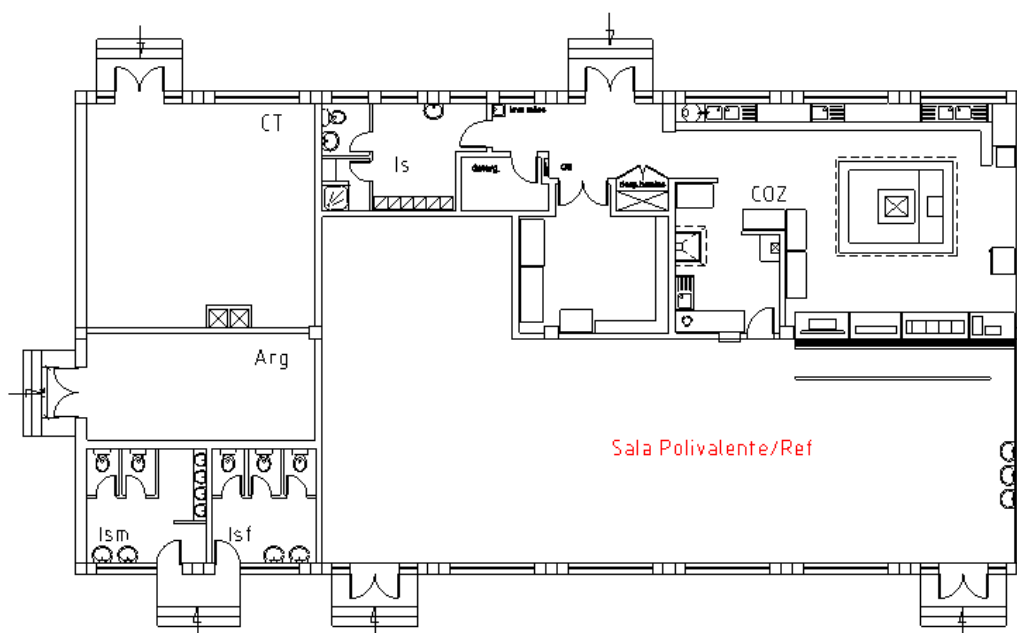


Figura 3.2 – Planta de projeto do refeitório da EB1 da Lousã

Do ponto de vista construtivo foi utilizada uma estrutura porticada de betão armado que suporta uma laje aligeirada, onde é aplicado um teto constituído por placas de fibra mineral prensada com revestimento decorativo fino (cerca de 1mm). As paredes são executadas em alvenaria de bloco, rebocadas com argamassa de cimento e revestidas com tinta plástica. Relativamente ao pavimento, o mesmo é revestido com material de fácil limpeza, mais propriamente mosaico cerâmico. O refeitório na fachada virada a Sul é constituído em grande parte por vãos envidraçados (janelas e portas) em caixilharia de alumínio e vidro duplo. Por um lado os vãos envidraçados valorizam a entrada de luz natural, mas em termos acústicos acarreta alguns problemas dado que, o vidro é um material bastante refletor.

A zona destinada à receção das refeições corresponde a dois grandes vãos abertos com ligação direta à cozinha, onde está instalado equipamento em inox e vidro. No espaço destinado às refeições o mobiliário existente ocupa parte da área do mesmo, sendo constituído por mesas em madeira e cadeiras em plástico.



Figura 3.3 – Mobiliário existente no refeitório da EB1 da Lousã

Na tabela seguinte, são apresentados alguns dados relativos ao refeitório relevantes para o estudo.

Tabela 3.1 - Dados do refeitório EB1 da Lousã

Refeitório EB1 da Lousã						
Área (m ²)	Pé direito (m)	Volume (m ³)	Solução de condicionamento acústico	Horário funcionamento	Capacidade	Nº de alunos/faixa etária
217	2.88	625	Teto com características acústicas	11:45 – 14:00	198	215 / (6-10 anos) 124 / (10-12 anos) 150 / (13-15 anos)

3.1.2 Refeitório EB2 da Lousã

A designada Escola nº2 da Lousã (EB2) recebe apenas alunos do 1º e 2º ciclo. A escola tem uma tipologia idêntica à EB1, sendo igualmente constituída por vários blocos correspondentes aos vários serviços e finalidades. Neste caso, o refeitório da EB2 está inserido no “Bloco C” sendo este, um edifício autónomo de apenas um piso com geometria retangular e contrariamente ao anterior, este é destinado a vários serviços. O espaço destinado ao refeitório apresenta uma geometria em “L” (figura 3.4) em que os vãos envidraçados estão virados a Norte e a Oeste.

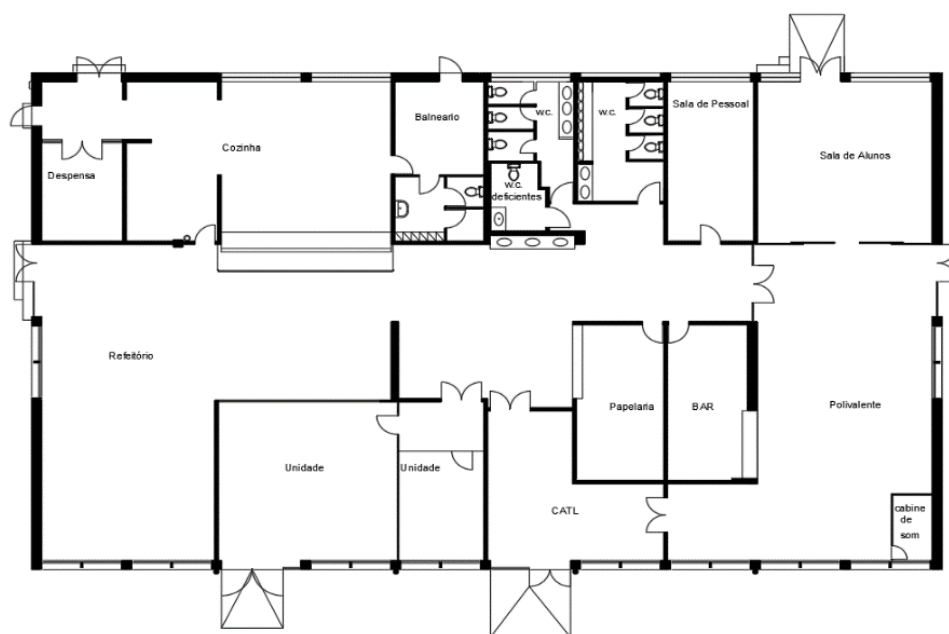


Figura 3.4 – Planta refeitório EB2 da Lousã

A entrada para o espaço é feita através de um grande vão aberto sem qualquer tipo de barreira para os espaços adjacentes sendo assim, um espaço não confinado. Relativamente ao sistema construtivo, trata-se de uma estrutura de betão armado e as paredes duplas executadas em alvenaria de tijolo. No interior as paredes são revestidas com material cerâmico até à altura de 2.13m e acima dessa altura são rebocadas com argamassa de cimento e pintadas com tinta plástica. O teto não tem qualquer solução construtiva com características acústicas sendo apenas, um teto suspenso em gesso cartonado liso e o pavimento é revestido a mosaico cerâmico.



Figura 3.5 – Refeitório EB2 da Lousã

Na entrada do refeitório situa-se a zona onde são entregues as refeições aos alunos, estando equipada com equipamentos em material de inox e vidro. No que diz respeito ao mobiliário existente, tanto as mesas como as cadeiras, são de madeira ocupando grande parte da área do espaço. Os dados relativos a este refeitório são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 3.2 – Dados do refeitório EB2 da Lousã

Refeitório EB2 da Lousã						
Área (m ²)	Pé direito (m)	Volume (m ³)	Solução de condicionamento acústico	Horário funcionamento	Capacidade	Nº de alunos/faixa etária
147	2.75/3	424	Inexistente	12:00 – 14:30	186	240 / (6-10 anos) 160 / (10-12 anos)

3.1.3 Refeitório EB/JI Santa Rita

No que se refere à escola básica/jardim de infância Santa Rita, a mesma difere das anteriores, no sentido que, tem a componente de jardim de infância, acolhendo alunos de faixas etárias inferiores e a componente de escola básica onde é lecionado apenas para o 1º ciclo. Este estabelecimento de ensino é composto por dois corpos, sendo um deles em forma de pavilhão onde estão inseridas as salas de aulas, o jardim de infância e os restantes serviços. O outro corpo construído no ano 2001 corresponde ao refeitório tendo este, uma geometria peculiar em forma de “fatia de pizza” e tal como no caso da EB1 trata-se de um edifício autónomo.

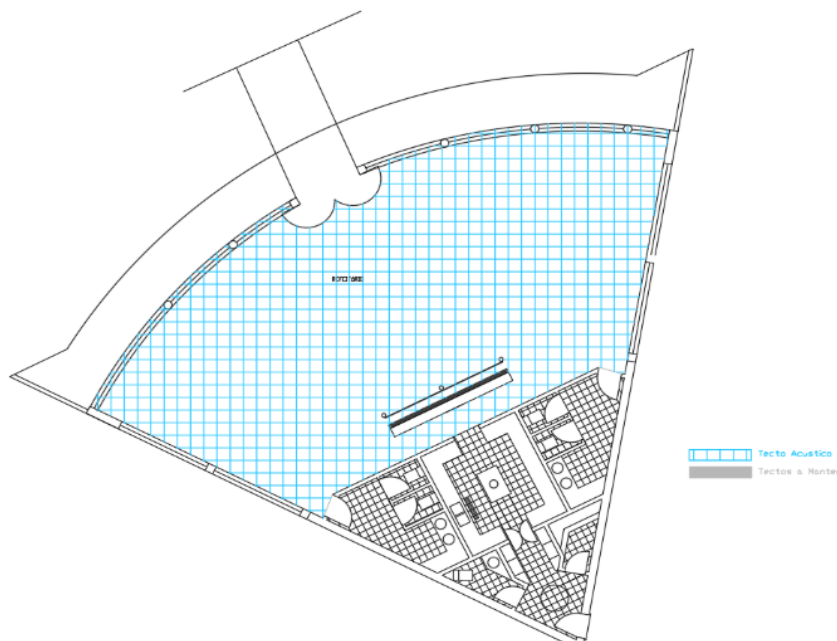


Figura 3.6 – Planta do refeitório da EB/JI Santa Rita

O sistema construtivo do refeitório é de todo idêntico aos refeitórios anteriormente descritos, sendo que, neste caso, no interior não existe material cerâmico a revestir os paramentos e o pavimento é revestido a mosaico cerâmico. Apesar de, na figura 3.6 o teto estar referenciado como acústico, após a visita ao local foi possível constatar que na realidade estavam instalados painéis amovíveis semi-perfurados (furos sem atravessamento), pelo que, foi considerado a inexistência de solução de correção acústica no teto. A fachada circular virada a sudeste é composta por grandes vãos envidraçados ocupando quase na totalidade toda a fachada e nas fachadas adjacentes, existem também vãos envidraçados, mas de dimensão bastante reduzida.

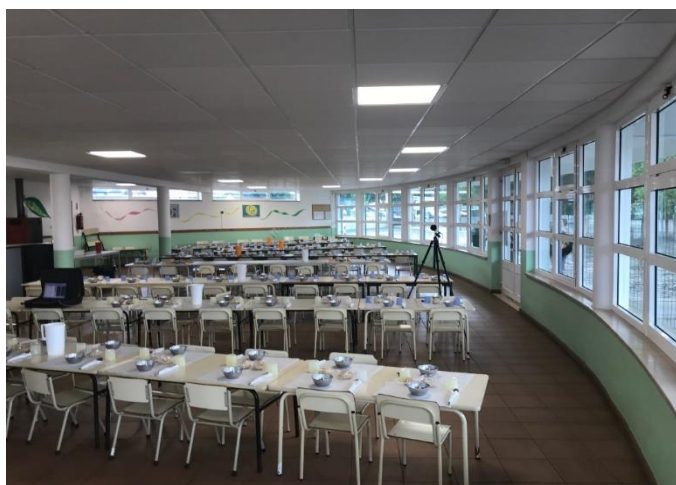


Figura 3.7 – Refeitório da EB/JI Santa Rita

Neste caso, contrariamente aos refeitórios anteriores, não existe uma ligação direta da cozinha para a zona de receção das refeições, ou seja, não existe equipamentos tipicamente usados neste tipo de espaço. Existe uma porta de madeira de duas folhas, tipo “vaivém”, que serve de acesso entre a cozinha e a sala de refeições e dentro desta está instalada uma banca em compacto fenólico que dá o apoio à distribuição das refeições. O mobiliário presente no local é em madeira ocupando parcialmente parte da área total. Na tabela seguinte são apresentados os dados relevantes deste espaço.

Tabela 3.3 – Dados do refeitório da EB/JI Santa Rita

Refeitório EB2 da Lousã						
Área (m ²)	Pé direito (m)	Volume (m ³)	Solução de condicionamento acústico	Horário funcionamento	Capacidade	Nº de alunos/faixa etária
183	2.5	456	Inexistente	12:00 – 13:30	108	60 alunos/ (3-5 anos) 90 alunos/ (6-10 anos)

3.2 Medições acústicas

As medições dos parâmetros acústicos nos três refeitórios foram realizadas antes do funcionamento dos mesmos, encontrando-se assim desocupados. Em todos eles foram medidos os tempos de reverberação e num deles foi medido o índice RASTI, STI e Definição D_{50} . Foram também medidos, os níveis de pressão sonora em dois refeitórios aquando do início de funcionamento dos mesmos. A escolha recaiu nos refeitórios que exibiam os valores de tempo de reverberação mais elevados e que não apresentavam soluções construtivas, tendo em vista o condicionamento acústico. Todas medições foram realizadas de acordo com a norma ISO 3382-2:2008. Existem dois métodos para gerar o ruído de teste, nomeadamente o método de ruído interrompido e o método do ruído impulsivo. Neste caso de estudo foi utilizada a técnica alternativa “maximum-length sequence” (MLS) que proporciona um nível sonoro suficiente para obter uma resposta impulsiva.

Para os referidos ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Analisador portátil, de dois canais, modelo Symphonie, da marca 01dB, ligado a PC portátil;
- Microfone modelo 40AF, com pré-amplificador do tipo 26AK, da marca “GRAS – Sound & Vibration” e calibrador de microfone, modelo CAL da marca 01dB;
- Sonómetro Integrador, modelo Solo Master, da marca 01dB, com microfone, modelo MCE212, e pré-amplificador, modelo PRE21S, da marca 01dB, e calibrador de microfone, modelo NC74, da marca RION;
- Fonte sonora omnidirecional normalizada de sons aéreos (dodecaédrica), modelo DO 12, da marca 01dB;
- Amplificador, modelo M700, com 600W de potência da marca 01dB;
- Gerador de ruído modelo RG-10 da marca 01dB.

3.3 Resultados das medições acústicas

3.3.1 Resultados do parâmetro T_{20}

Na figura 3.11 e tabela 3.4 são apresentados os valores médios das leituras de T_{20} em banda de oitava para todos os pares Fonte-Recetor, relativos aos ensaios experimentais descritos no capítulo anterior.

Tabela 3.4 – Valores médios de T_{20} dos três refeitórios

Frequência (Hz)	Tempos de Reverberação (s)		
	Escola EB1	Escola EB2	EB/JI Santa Rita
125	1.29	1.99	1.76
250	1.38	2.10	1.55
500	0.92	2.34	1.83
1000	0.84	2.28	1.99
2000	0.99	2.09	1.79

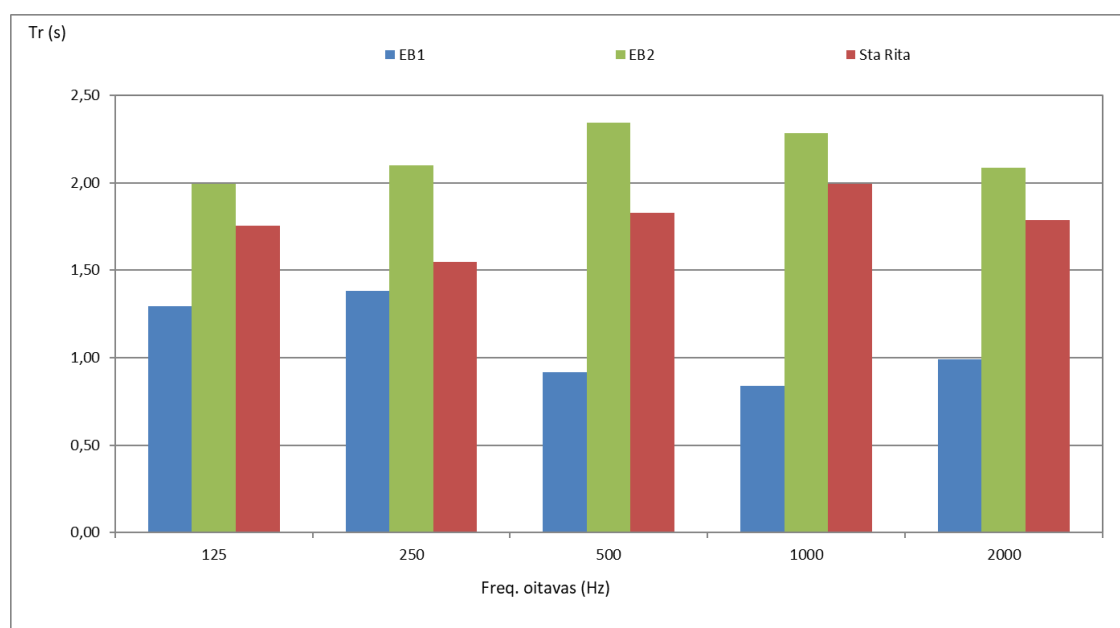


Figura 3.8 – Gráfico dos valores médio de T_{20} dos três refeitórios

3.3.2 Resultados dos parâmetros D₅₀, RASTI e STI

Dos dois refeitórios onde foi medido o ruído ambiente, optou-se de forma aleatória pelo refeitório da EB2 da Lousã, para medição do índice D₅₀, RASTI e STI. Na tabela 3.5 são apresentados os valores médios desses mesmos parâmetros, sendo calculado também o parâmetro D₅₀ (500-2000Hz), resultante da média dos valores D₅₀ para as bandas de oitava 500Hz e 2000Hz.

Tabela 3.5 – Valores médios de D₅₀, RASTI e STI no refeitório da EB2 da Lousã

Frequência (Hz)	Escola EB2			
	D ₅₀ (%)	D ₅₀ (500Hz, 2000Hz) (%)	RASTI (%)	STI (%)
125	31,92	31	48	50
250	34,74			
500	28,83			
1000	32,98			
2000	34,04			

3.3.3 Resultado do nível de pressão sonora

As medições dos níveis de pressão sonora nos refeitórios da EB2 da Lousã e EB/JI Santa Rita, foram realizadas quando os mesmos se encontravam em funcionamento, sendo a duração cerca de uma hora. Como referenciado no capítulo 2.2.1 é utilizado o indicador de nível de pressão sonora equivalente L_{eq}, devido às variações do ruído ao longo do tempo. Estes valores são obtidos diretamente dos equipamentos de medição para intervalos de tempo $\Delta T=3s$.

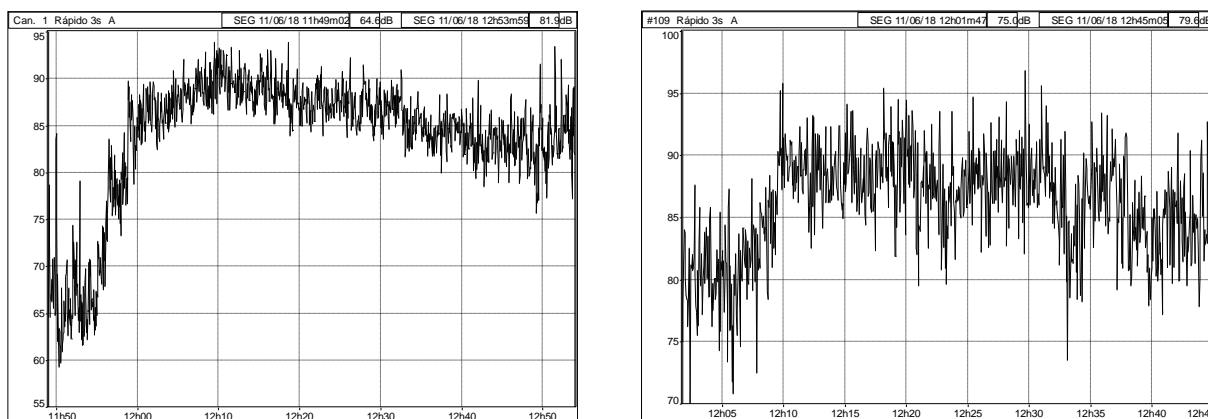


Figura 3.9 – Níveis de pressão sonora ao longo do tempo (à esquerda da EB2 da Lousã; à direita da EB/JI Santa Rita)

O valor médio do nível de pressão sonora, ponderado A, LA_{eq} dB(A) correspondente à duração do ensaio, pode ser determinado através dos valores parciais de L_{eq} dB(A) ao longo do tempo (equação 12) ou através do espectro de frequência dado pela equação 13. (Mateus, Diogo 2009)

$$LA_{eq} = 10 \log\left(\frac{1}{T} \sum \Delta t_i \cdot 10^{\left(\frac{L_i}{10}\right)}\right) \quad (12)$$

$$LA_{eq} = 10 \log\left(\sum 10^{\left(\frac{L_{fk}}{10}\right)}\right) \quad (13)$$

Tabela 3.6 – Valor médio do nível de pressão sonora na EB2 da Lousã e EB/JI Santa Rita

	Escola EB2	EB/JI Santa Rita
LA_{eq} dB(A)	86.5	87.7

3.4 Análise de resultados

Após a realização dos ensaios é possível fazer a primeira análise, aos resultados obtidos e consequentemente a caracterização do desempenho acústico dos refeitórios em estudo.

Relativamente aos tempos de reverberação é necessário constatar se os mesmos cumprem os requisitos regulamentares. Segundo o mencionado no capítulo 2.3 e tendo em conta a equação 11 assim como, os dados da tabela 3.1, 3.2, 3.3 e os resultados obtidos experimentalmente, chegou-se aos valores da tabela seguinte.

Tabela 3.7 – Verificação do cumprimento regulamenta para os tempos de reverberação

	Escola EB1	Escola EB2	EB/JI Santa Rita
Média (500Hz, 1000Hz e 2000Hz)	0.92	2.24	1.87
Limite RRAE	1.18	1.13	1.16
T_r corrigido com o fator I	0.63	1.96	1.58
	Cumpre	Não cumpre	Não cumpre

Como se pode apurar da tabela 3.7 apenas o refeitório referente à Escola EB1 cumpre os requisitos regulamentares. Tal situação já era expectável devido ser o único espaço dotado de soluções construtivas tendo em vista o condicionamento acústico e também dada a sua recente

construção que obrigou ao cumprimento de requisitos regulamentares. Mesmo incrementando outro tipo de solução construtiva, o valor de T_r poderia baixar ligeiramente, mas o desconforto relatado pelos usuários do espaço deve-se às fontes que originam ruído, pelo que, a solução teria de passar por outra alternativa.

De ressaltar que mesmo diminuindo o valor obtido T_r com o Fator I, correspondente a 25% do limite regulamentar, os refeitórios das escolas EB2 e EB/JI Santa Rita não cumprem os requisitos regulamentares, apresentando valores bastante superiores. Neste caso, em consequência da inexistência de soluções que visam o condicionamento acústico, era de esperar que os resultados não cumprissem os requisitos regulamentares. Na escola EB/JI Santa Rita apesar de, o projeto contemplar um teto com características acústicas como se pode verificar é ineficaz e daí ter sido considerado no capítulo 3.1.3 como inexistente, dado o tipo de solução adotada.

No que respeita a estes refeitórios, o que apresenta maior volume exibe o tempo de reverberação menor, apesar da existência de uma grande área de envidraçados que origina grandes reflexões, mas em termos de capacidade de absorção é superior ao revestimento cerâmico presente no refeitório da EB2 da Lousã que em termos de absorção, é quase nula. Por outro lado, o refeitório da EB2 da Lousã não é confinado, existindo um vão aberto para o interior com grande volume o que deveria influenciar o tempo de reverberação para valores inferiores, consequência da sua absorção.

Relativamente à questão da inteligibilidade da palavra, na Escola EB2 da Lousã e tendo em conta os valores da tabela 3.5 e os dados da tabela 2.3 pode-se considerar que a avaliação subjetiva é pobre, apesar do índice STI estar na fronteira do aceitável, apresentando um valor de 50%. Na questão da %ALCons verifica-se que a perda de informação se situa no intervalo de 12% a 24.2%, ou seja, só é perceptível 88% a 75.8% da mensagem recebida.

Esta perda está relacionada com o elevado tempo de reverberação existente. As vogais têm um nível de pressão sonora superior às consoantes e são mais ricas em baixas frequências, enquanto as consoantes são mais ricas em altas frequências. Dado o T_r ser alto leva a que o decaimento da energia da vogal seja mais lento, levando a que exista um momento de sobreposição com a consoante emitida imediatamente a seguir. Esta situação leva a um fenómeno designado de mascaramento parcial ou total da consoante, dado que um som de baixa frequência e nível de pressão sonora alto mascara outro som com frequência superior ou inferior. (Isbert, 1998)

Do índice de definição D_{50} , o resultado obtido está muito abaixo do pretendido uma vez que o mínimo deveria ser superior a 50%. Este resultado deve-se à existência de uma grande área de superfícies refletoras, não existindo grande absorção, o que faz com que a energia total recebida, tenha um valor alto.

Acerca dos níveis de pressão sonora medidos nos refeitórios das escolas EB2 da Lousã e EB/JI Santa Rita, os mesmos são elevados. Os resultados são idênticos em ambos os refeitórios, o que seria esperar tendo em conta as faixas etárias dos alunos presentes nos espaços. Apesar de, em Portugal não existir regulamentação para limites níveis de ruído ambiente, a comparação irá ser feita com os valores limites de exposição diária presentes na Diretiva n.º 2003/10/CE, que impõe o limite nos 80 dB(A). Simultaneamente também se poderá comparar com a escala da figura seguinte que relaciona o nível de ruído ambiente com o efeito na saúde do ser humano.

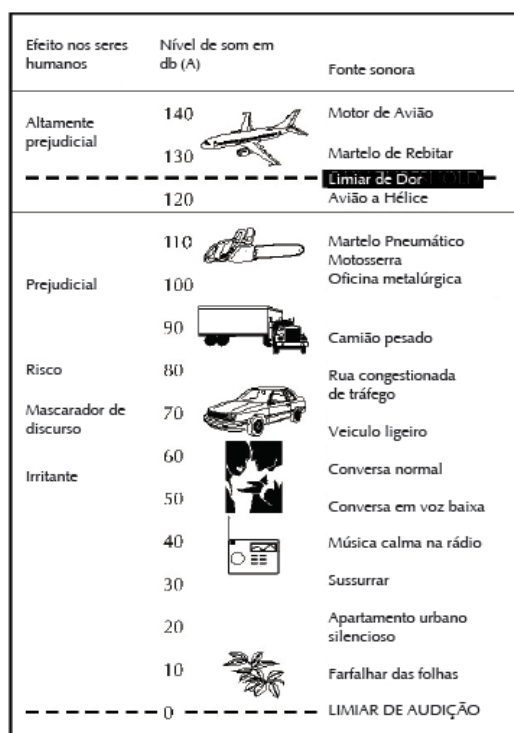


Figura 3.10 – Impacto no nível de ruído ambiente na saúde humana (Ruído no Trabalho, 2009)

Ainda que os níveis de pressão sonora medidos correspondam a exposições de curta duração e na Diretiva n.º 2003/10/CE corresponda a exposição de 8 horas, pode-se constatar que eles ultrapassam o limite de 80 dB(A), tornando-se incomodativo para as pessoas presentes nos locais. Estes resultados aliados aos elevados tempos de reverberação, prejudicam na inteligibilidade da palavra afetando o diálogo e conseqüentemente a comunicação auxiliares-

alunos pode ser impercetível, conduzindo a eventuais acidentes. Na perspetiva da escala presente na figura 3.13 é possível constatar que o nível de pressão sonora medido é equivalente ao ruído de um camião pesado, o que em termos de impacto na saúde está entre o fator de risco e o prejudicial.

Contudo, a aplicação de soluções construtivas visando o melhoramento do condicionamento acústico daqueles espaços e assim atingir valores de tempo de reverberação desejados, permitiria também melhorar o aspeto da inteligibilidade da palavra e por conseguinte, os níveis de pressão sonora poderiam reduzir, mas iam-se manter elevados.

Além da questão da correção do condicionamento acústico daqueles espaços, ter-se-á de ter em consideração a questão das fontes de ruído, nomeadamente os alunos. Segundo o exposto no capítulo 2, a questão da SNR é fundamental para melhorar a comunicação verbal. Tendo como base os dados do refeitório da EB2 da Lousã e o modelo de previsão de Rindel descrito nesse capítulo, o nível de pressão sonora medido era previsível. Atendendo que a relação volume por pessoa seria de 3.5, T_r igual a 2.25s e segundo o gráfico da figura 2.1 o nível de ruído ambiente seria superior a 85 dB(A), o que se verifica.

Segundo a tabela 2.1 para SNR= -3 e levando em conta a disposição típica das mesas nos refeitórios, significaria que a distância de comunicação está entre $r=1m$ (pessoa frente a frente) e $r=0,5m$ (pessoa lado a lado) impondo assim, que o nível de ruído ambiente seria de 71 dB(A) e 83 dB (A) respetivamente. Para o nível de ruído ambiente existente no refeitório da EB2 da Lousã, a distância de comunicação teria de ser $r=0,35m$ e assim atingir o valor mínimo aceitável da SNR.

Na continuação do estudo de Rindel outro fator importante é a taxa de ocupação dos refeitórios, e segundo autor, nesses locais a taxa devia ser de 50% (tabela 2.2) para uma distância de comunicação de $r=1m$, ou seja, a capacidade do refeitório da EB2 da Lousã é de 186 significando que deveria apenas ser ocupado por 93 pessoas.

Estas análises levam a que a correção do condicionamento acústico não se centre apenas na diminuição do tempo de reverberação, com a aplicação de soluções construtivas, mas também abordar outro tipo de análise, nomeadamente diminuir o nível de ruído ambiente gerado pelas fontes sonoras através de uma melhor organização do número de pessoas presentes no local, para que exista conforto acústico.

4 MODELAÇÃO ACÚSTICA DO REFEITÓRIO DA EB2 DA LOUSÃ

4.1 Apresentação da metodologia

A modelação numérica é feita através da definição de objetos matemáticos tendo em conta a geometria do espaço, ou seja, com a introdução de coordenadas dos vários pontos é possível definir esses mesmos objetos designados de planos. Neste caso, através da planta cedida pela Câmara Municipal da Lousã e com recurso ao software CAD, foi possível obter as coordenadas dos vértices de cada plano. De ressaltar que apenas foi cedida a planta, não existindo cortes do espaço nem o mobiliário existente. Assim para a caracterização geométrica do espaço foi feito o levantamento de medidas do refeitório, tendo sido feitas algumas retificações e recolhida informação acerca do mobiliário existente.

Para este modelo numérico, o refeitório foi considerado como um volume, tentando ser uma representação geométrica muito próxima da realidade. Devido à complexidade do programa CATT – ACOUSTIC™ o mobiliário, entenda-se mesas e cadeiras, foi simplificado considerando-se planos suspensos. Após a introdução das várias coordenadas é necessário definir os planos que, tem como base, a regra da mão direita em que o polegar corresponde à superfície absorvente. No caso do mobiliário foram criados dois planos dado que tem duas superfícies absorventes e a área equivalente de absorção, corresponde às duas faces.

Foi criado um ficheiro GEO que foi introduzido no programa CATT – ACOUSTIC™ com a informação dos pontos (corners), planos e os coeficientes de absorção associados a cada material.

Tabela 4.1 – Dados geométricos da EB2 da Lousã no programa CATT – ACOUSTIC™

Volume	Cantos	Planos	Ficheiro
EB2	1 a 106	1 a 53	Master1_iteração.GEO

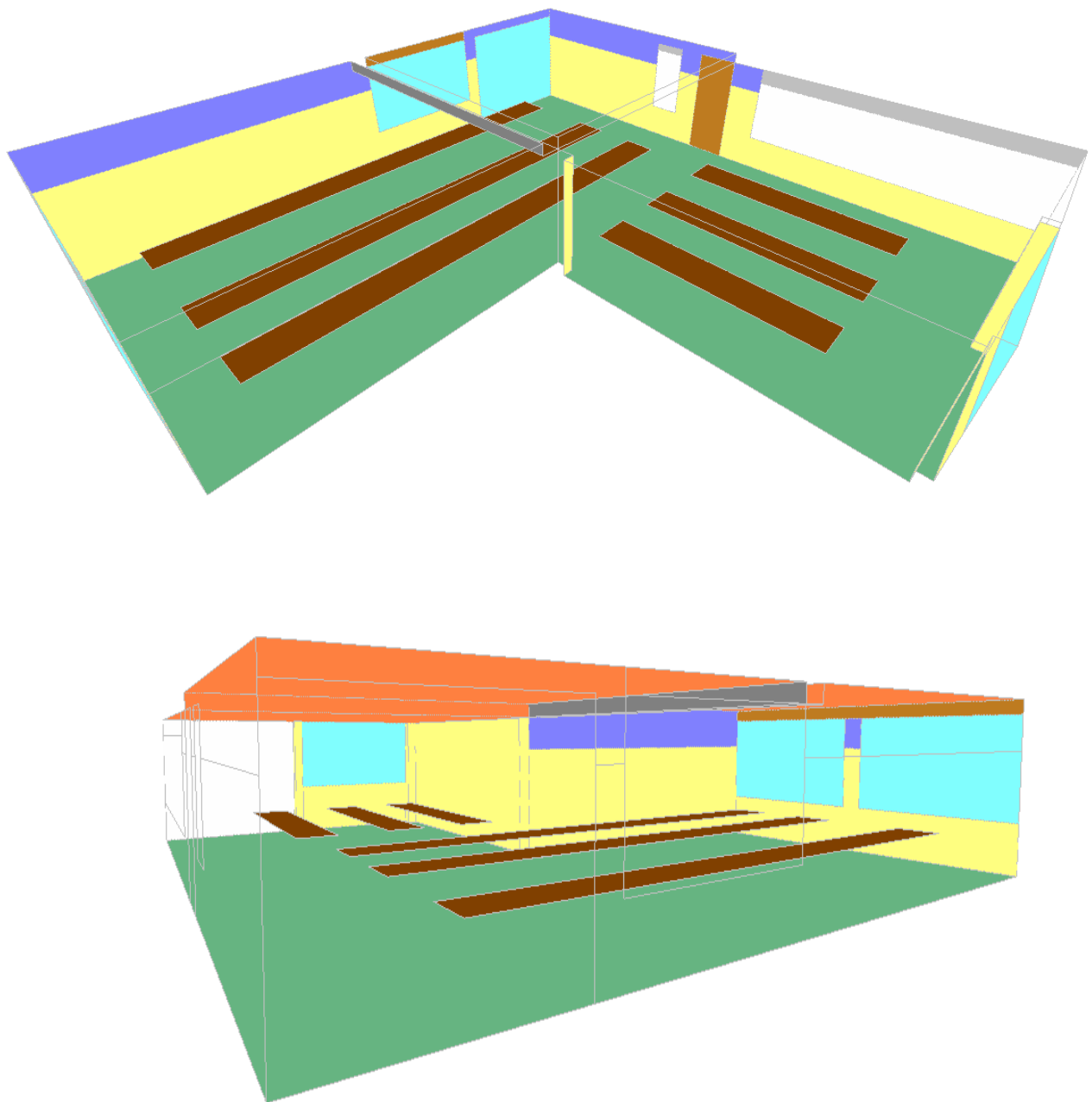








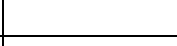




Figura 4.1 – Perspetivas do modelo do refeitório da EB2 da Lousã

Tabela 4.2 – Revestimentos associados às cores do modelo

Pavimento rev. Cerâmico	
Parede rev. cerâmico	
Parede reboco	
Vidro	
Madeira lisa	
Mobiliário	
Teto betão	
Teto gesso cartonado liso	
Vão aberto p/ interior de grande volumetria	
Vão aberto p/ interior de pequena volumetria	
Revestimento metálico	

4.1.1 Coeficientes de absorção α

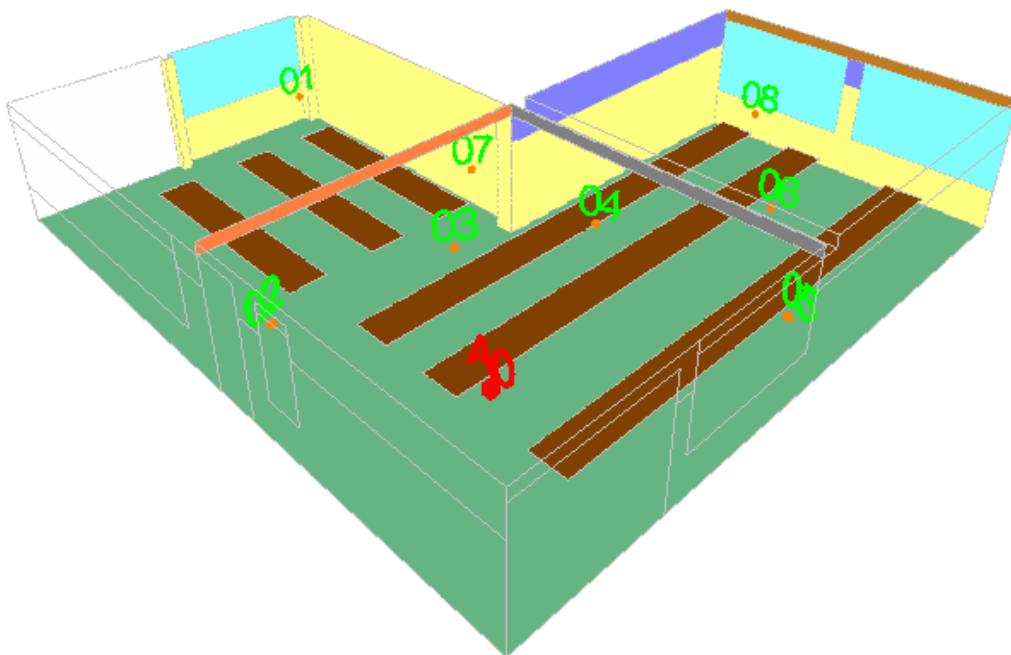
Para cada superfície é necessário atribuir um coeficiente de absorção α , correspondente ao material de revestimento. Neste estudo utilizou-se valores de α propostos em bibliografia de referência que são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 4.3 – Coeficientes de absorção α , dos materiais (Beranek, 1996) (Bies e Hansen, 1997) (Mateus, 2017)

Materias/sistema construtivo/zonas	Coeficientes de absorção para cada banda de frequência					
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Pavimento rev. cerâmico	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Parede rev. cerâmico	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
Parede reboco	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05
Vidro	0.12	0.08	0.05	0.04	0.03	0.02
Madeira lisa	0.03	0.25	0.20	0.17	0.15	0.10
Mobiliário	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04
Teto betão	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
Teto gesso cartonado liso	0.16	0.12	0.1	0.08	0.06	0.06
Vão aberto p/ int. de grande volumetria	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Vão aberto p/ int. de pequena volumetria	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Revestimento metálico	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

4.1.2 Fontes e recetores

Pelo fato do programa utilizado ser a versão demo, o número de raios está limitado a 5000 raios. Como consequência e aliado ao volume do refeitório não ser muito grande, assumiu-se três posições para as fontes (A0, A1 e A2) e oito posições (1,2,3,4,5,6,7 e 8) para os recetores, contabilizando assim 15 000 raios, sendo os resultados a média das três posições das fontes. Foi assim criado dois ficheiros LOC, referentes às fontes e aos recetores que posteriormente foram introduzidos no programa CATT – ACOUSTIC™.



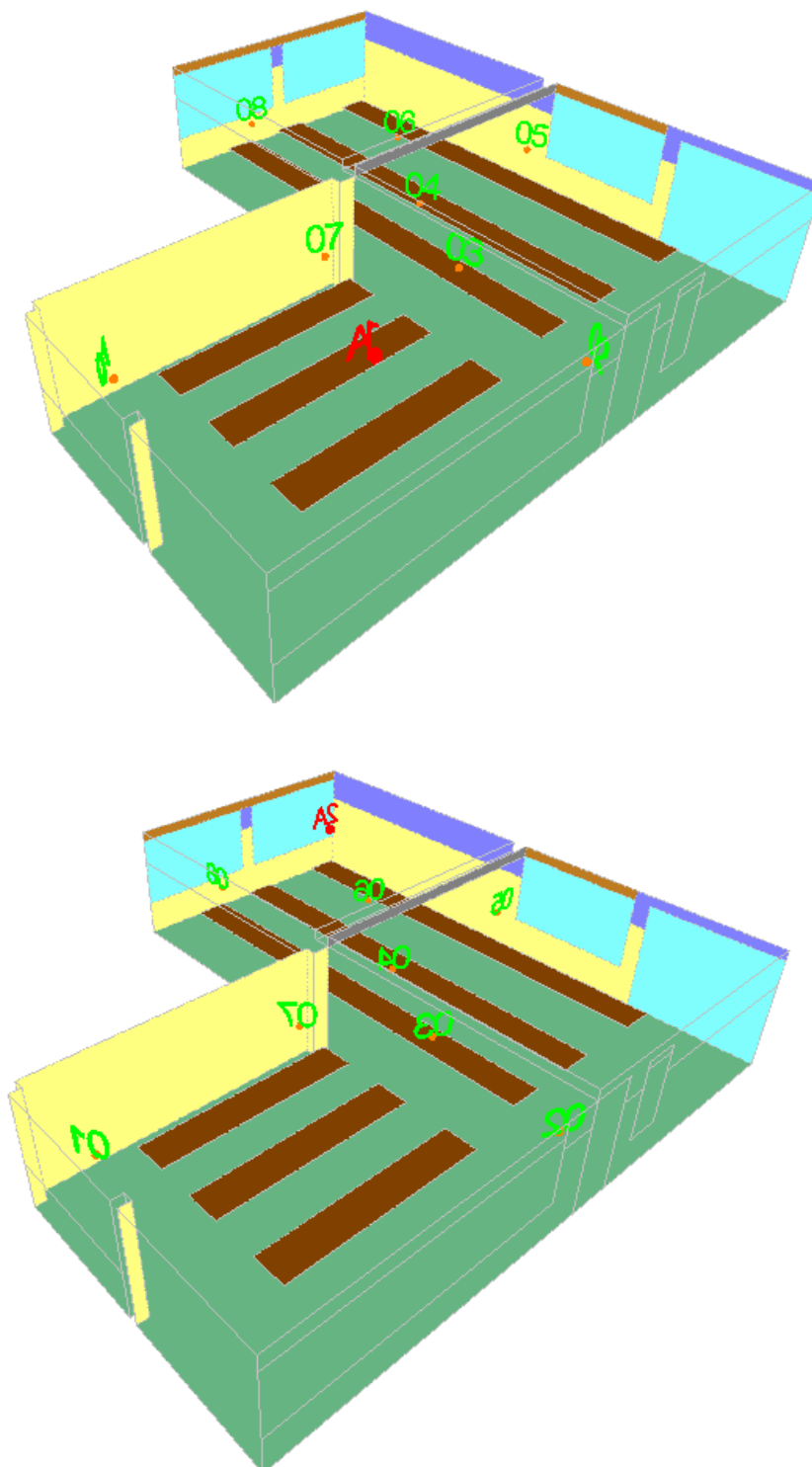


Figura 4.2 – Posição de fontes e recetores do modelo

4.2 Calibração do modelo

É necessário calibrar o modelo de forma a que, este se torne válido tendo em conta os resultados obtidos experimentalmente. Para isso realizou-se a comparação dos resultados obtidos da modelação e os experimentais. O principal parâmetro utilizado para calibrar o modelo é o tempo de reverberação, dado que é dos parâmetros mais importantes para a caracterização de espaços fechados e além disso, o seu valor não varia muito com a posições dos recetores. Neste caso de estudo assume-se o modelo calibrado, quando forem alcançados tempos de reverberação com desvios máximos absolutos de 0,1s para as respetivas bandas de frequência.

Tabela 4.4 – Objetivo da calibração para o tempo de reverberação

Bandas de frequência (Hz)	T_r medido (s)	Desvio (s)	T_r mín (s)	T_r máx (s)
125	1.99	± 0.1	1.89	2.09
250	2.10	± 0.1	2.00	2.20
500	2.34	± 0.1	2.24	2.44
1000	2.28	± 0.1	2.18	2.38
2000	2.09	± 0.1	1.99	2.19

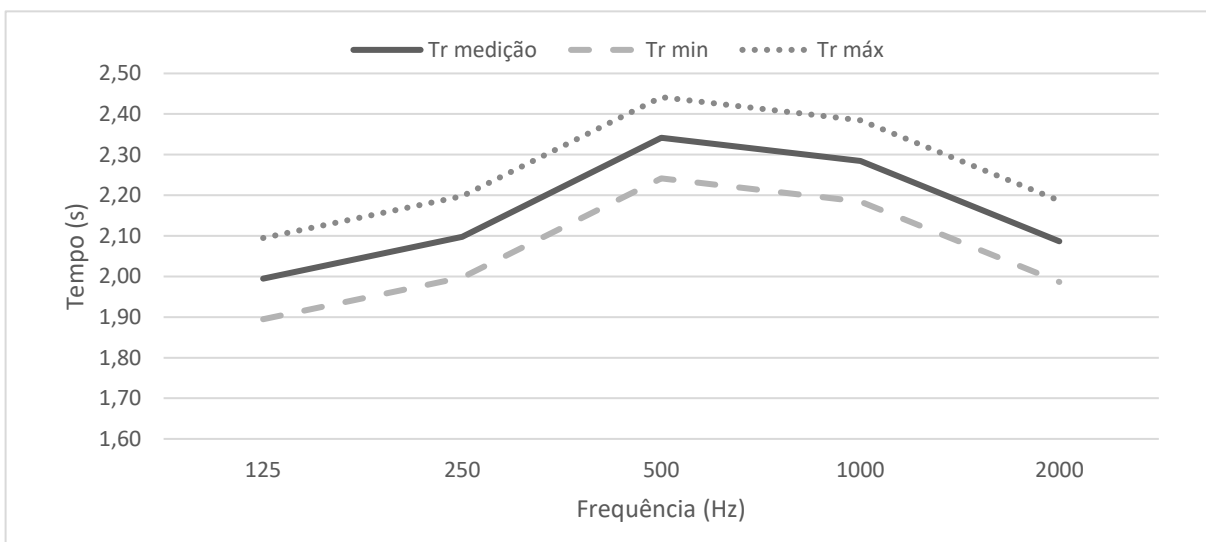


Figura 4.3 – Representação gráfica do T_r medido e o intervalo admissível para calibração do modelo.

Na calibração foi feita igualmente a comparação dos parâmetros D_{50} , STI e RASTI medidos experimentalmente e os resultantes das simulações de calibração, permitindo assim detetar alguns desvios que possam existir.

4.2.1 1ª iteração para calibração

Tendo em conta todas as informações apresentadas anteriormente, nomeadamente os dados geométricos, os coeficientes de absorção dos materiais e respetivas posições das fontes e recetores, são apresentados de seguida os resultados obtidos da 1ª iteração.

Tabela 4.5 – Tempos de reverberação obtido na 1ª iteração

Bandas de frequência (Hz)	T_r 1ª iteração (s)	T_r mín (s)	T_r máx (s)	Cumprimento dos requisitos
125	1.82	1.89	2.09	Não cumpre
250	2.03	2.00	2.20	Cumpre
500	2.30	2.24	2.44	Cumpre
1000	2.40	2.18	2.38	Não cumpre
2000	2.27	1.99	2.19	Não cumpre

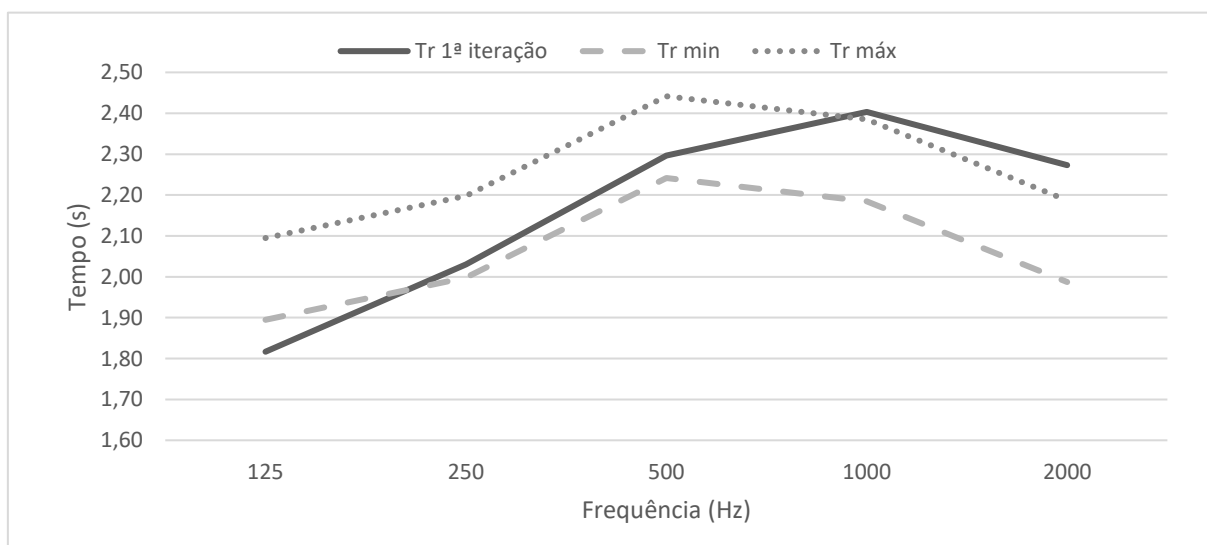


Figura 4.4 – Representação gráfica dos valores T_r obtidos na 1ª iteração

Apesar de ser ainda a 1ª iteração de calibração do modelo, com os resultados obtidos já foi possível cumprir o valor do tempo de reverberação em três bandas de frequência. Nas restantes bandas de frequência embora não ter sido atingido o objetivo, os mesmos não diferem muito e a sua distribuição assemelha-se aos resultados medidos. Poder-se-á concluir que os resultados obtidos desta 1ª iteração estão em concordância com os objetivos propostos.

Relativamente aos restantes parâmetros acústicos obtidos desta 1ª iteração, os mesmos são apresentados de seguida sendo possível comparar com os valores medidos.

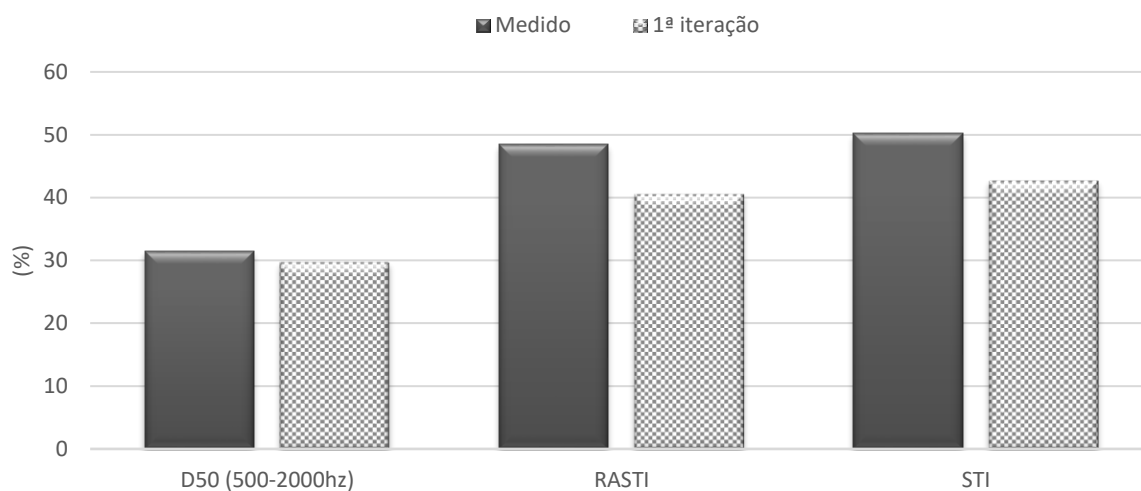


Figura 4.5 – Comparação resultados medidos D₅₀ (500-2000Hz), RASTI, STI vs. resultados obtidos 1ª iteração

4.2.2 2ª iteração para calibração

Nesta 2ª iteração realizaram-se alguns ajustes nos valores dos coeficientes de absorção, de modo a ser possível a validação do modelo. Entre os valores dos coeficientes de absorção admitidos para a calibragem do modelo, os que suscitam mais dúvidas são os relativos aos vãos abertos, dada a dificuldade de prever quais os valores de α para cada banda de frequência. Outro elemento na qual existem várias propostas de valores α é o teto em gesso cartonado liso e devido à sua área foram ajustados os seus coeficientes de absorção. Por essa razão, ajustou-se os valores de α no vão aberto para interior de grande volumetria e do teto de gesso cartonado liso para os valores apresentados na tabela seguinte.

Tabela 4.6 – Valores dos coeficientes de absorção corrigidos para a 2ª iteração

Materias/sistema construtivo/zonas	Coeficientes de absorção para cada banda de frequência					
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Vão aberto p/ interior de grande volumetria	0.45	0.45	0.50	0.55	0.55	0.50
Teto gesso cartonado liso	0.15	0.11	0.10	0.09	0.08	0.06

Com os ajustes destes valores e realizando o cálculo desta 2ª iteração os resultados obtidos são apresentados na tabela 4.7 e figura 4.6.

Tabela 4.7 - Tempos de reverberação obtido na 2ª iteração

Bandas de frequência (Hz)	T_r 2ª iteração (s)	T_r mín (s)	T_r máx (s)	Cumprimento dos requisitos
125	1.89	1.89	2.09	Cumpre
250	2.12	2.00	2.20	Cumpre
500	2.29	2.24	2.44	Cumpre
1000	2.28	2.18	2.38	Cumpre
2000	2.07	1.99	2.19	Cumpre

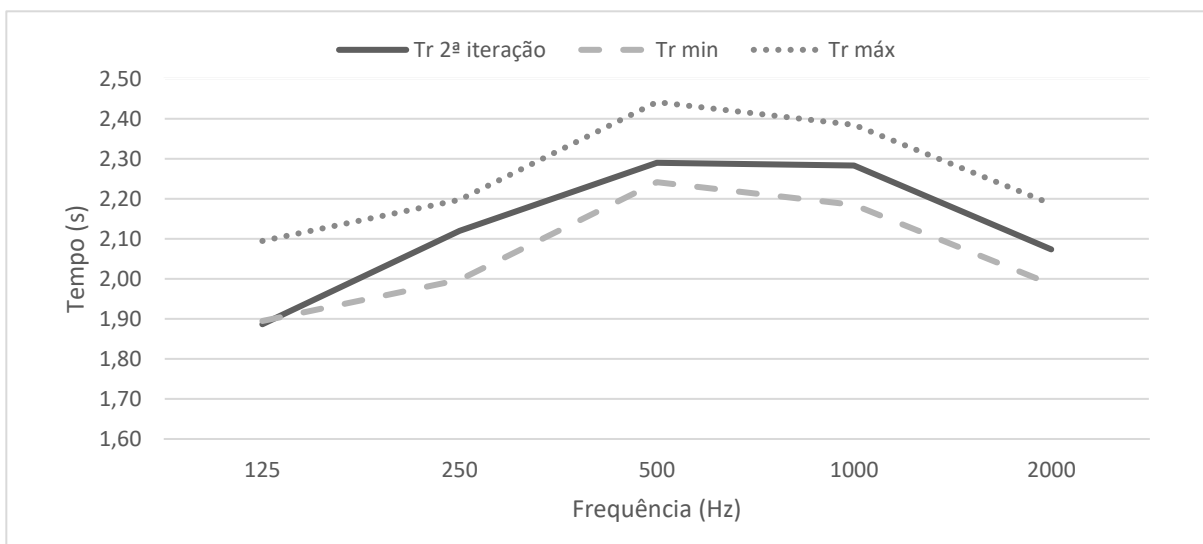


Figura 4.6 – Representação gráfica dos valores T_r obtidos na 2ª iteração

Dos resultados obtidos da 2ª iteração pode-se constatar que é cumprido os objetivos propostos para os tempos de reverberação e poder-se-ia considerar o modelo como calibrado. No entanto, para a banda de frequência de 125Hz o resultado obtido é igual ao valor mínimo exigido e na banda de frequência de 500 Hz, o valor também está perto desse valor ficando a distribuição um pouco diferente dos resultados medidos. Por esses motivos optou-se por uma 3ª iteração de modo a aproximar o máximo possível o modelo aos resultados medidos. Os resultados obtidos referentes aos restantes parâmetros acústicos são apresentados de seguida.

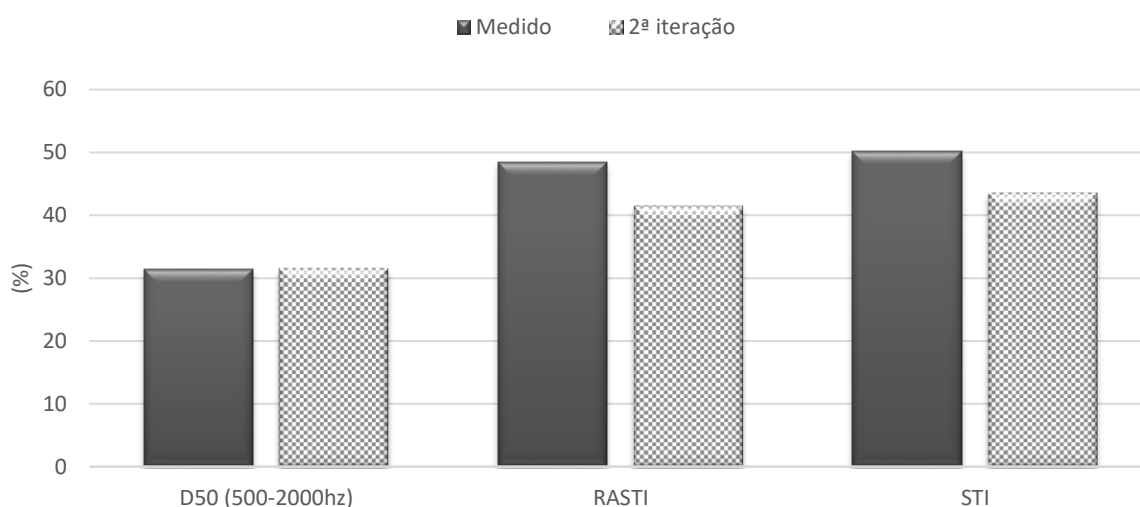


Figura 4.7 – Comparação resultados medidos D₅₀ (500-2000Hz), RASTI, STI vs. resultados obtidos 2ª iteração

4.2.3 3ª iteração para calibração

Na consequência da 2ª iteração foram ajustados os valores dos coeficientes de absorção α para os mesmos elementos escolhidos nessa mesma iteração. Assim, os novos valores de α são apresentados na tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Valores dos coeficientes de absorção corrigidos para a 2ª iteração

Materias/sistema construtivo/zonas	Coeficientes de absorção para cada banda de frequência					
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Teto gesso cartonado liso	0.13	0.11	0.10	0.09	0.08	0.06
Vão aberto p/ interior de grande volumetria	0.45	0.45	0.45	0.55	0.55	0.50

Após a retificação dos coeficientes de absorção e calculando novamente, os resultados da 3ª iteração são os seguintes:

Tabela 4.9 - Tempos de reverberação obtido na 3ª iteração

Bandas de frequência (Hz)	T_r 3ª iteração (s)	T_r mín (s)	T_r máx (s)	Cumprimento dos requisitos
125	2.00	1.89	2.09	Cumpre
250	2.12	2.00	2.20	Cumpre
500	2.34	2.24	2.44	Cumpre
1000	2.29	2.18	2.38	Cumpre
2000	2.07	1.99	2.19	Cumpre
4000	1.78	1.65	1.85	Cumpre

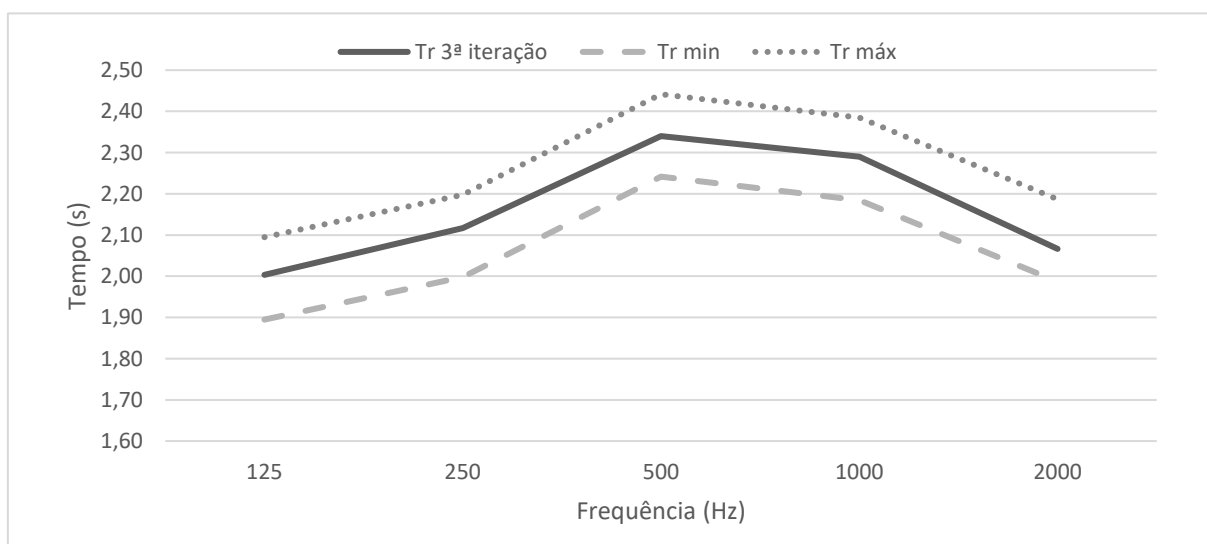


Figura 4.8 – Representação gráfica dos valores T_r obtidos na 3ª iteração

Esta 3ª iteração foi feita apenas para melhorar o modelo e ajustá-lo o mais possível aos valores medidos visto que, na iteração anterior já estavam cumpridos os requisitos. Da tabela 4.10 é possível constatar que os resultados obtidos estão muito próximo das medições e assim considera-se este modelo calibrado e conseqüentemente válido.

Tabela 4.10 – Comparação dos valores de T_r obtidos da 3ª iteração e os medidos

Bandas de frequência (Hz)	T_r 3ª iteração (s)	T_r medido (s)	Desvio (%)
125	2.00	1.99	+ 0.005 %
250	2.12	2.10	+ 0.009 %
500	2.34	2.34	0 %
1000	2.29	2.28	+ 0.004 %
2000	2.07	2.09	- 0.009 %
4000	1.78	1.75	+ 0.017 %

De seguida são apresentados os restantes parâmetros acústicos resultantes da 3ª iteração comparados com os valores medidos.

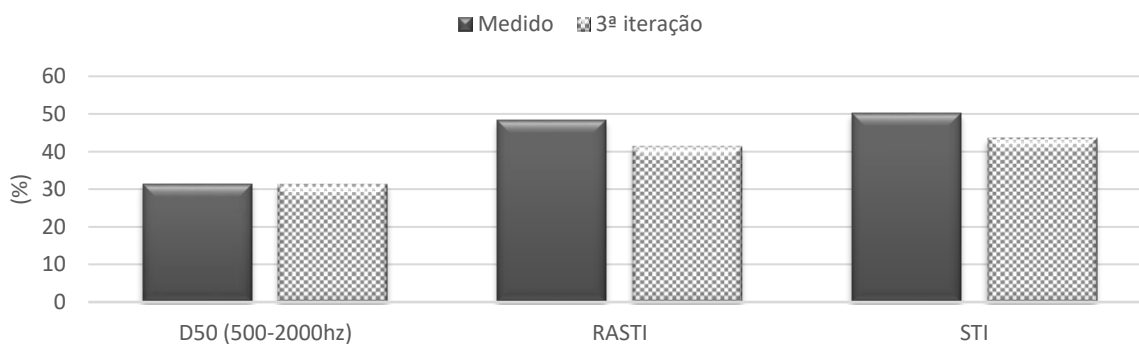


Figura 4.9 – Comparação resultados medidos D_{50} (500-2000Hz), RASTI, STI vs. resultados obtidos 3ª iteração

Após concluída a 3ª iteração poder-se-á afirmar que os resultados obtidos são satisfatórios, destacando-se os tempos de reverberação e o parâmetro D_{50} (500-2000Hz) que apresentaram valores muito idênticos aos valores obtidos experimentalmente. Em relação aos valores obtidos para os parâmetros RASTI e STI, estes ficaram um pouco abaixo dos valores medidos *in-situ*.

5 ESTRATÉGIAS DE INTERVENÇÃO DE CORREÇÃO ACÚSTICA

O condicionamento acústico contempla o estudo da propagação do som no interior de um espaço fechado que tem como objetivo, oferecer a melhores características de modo a criar o melhor ambiente acústico consoante a finalidade do espaço. No caso de locais como os refeitórios, interessa que os valores dos tempos de reverberação sejam baixos, não só pelo limite imposto pela legislação portuguesa, como pela questão do nível de pressão sonora ambiente que tende a baixar, derivado de as pessoas frequentadoras desses espaços tenderem a baixar o tom de voz com a presença de tempos de reverberação baixos. Nestes locais, outro fator importante está relacionado com a inteligibilidade da palavra, consequência da interação entre auxiliares-alunos que sendo pobre, poderá ser causadora de incidentes. Para uma boa inteligibilidade palavra a mesma está normalmente associada a espaços de grande volume e tempos de reverberação baixos, com as primeiras reflexões a acontecerem tendencialmente nas superfícies mais próximas (paredes e tetos) que contribuem para o controlo da direção e tempo de chegada ao recetor, culminando na eventual dispensa de difusão.

Quando se está perante a fase de projeto, com mais ou menos dificuldade consegue-se adotar estas características ao local, mas nesta dissertação trata-se de espaços já existentes, ou seja, trata-se de reabilitação acústica e de todas as condicionantes associadas à mesma. Consoante o tipo de utilidade dos locais existem parâmetros acústicos adequados a cada espaço, da mesma forma as soluções construtivas que visam a reabilitação acústica, têm de partir do mesmo princípio. Assim neste capítulo serão sugeridas soluções construtivas existentes no mercado e realizadas simulações com o modelo calibrado, de modo a constatar os benefícios da aplicação das mesmas.

5.1 Metodologia e soluções construtivas

Como foi dito anteriormente, as primeiras reflexões tendem a acontecer nas paredes e tetos. Partindo desse pressuposto, a aplicação de soluções construtivas que visam o melhoramento do condicionamento acústico foram colocadas nessas zonas e tiveram em conta o tipo de local a que se destinam. Foram feitas cinco propostas de intervenção, sendo três delas no teto, uma nas paredes e uma quinta que foi a melhor intervenção dos tetos conjuntamente com a intervenção das paredes. De salientar, que em todas as intervenções foi proposta uma solução para o pavimento apenas pelo motivo de atenuar o ruído resultante do arrastar de cadeiras e uma

questão de melhoramento do conforto já qu, para os resultados a influência é quase nula. Na tabela 5.1 são apresentadas as estratégias de intervenção com as respetivas soluções.

Tabela 5.1 – Estratégias de intervenção com as respetivas soluções construtivas

Intervenção	Solução	Zonas
1 ^a	Tipo BASWA Phon Base / Linóleo	Teto/Pavimento
2 ^a	Tipo Knauf Cleaneo/ Linóleo	Teto/Pavimento
3 ^a	Tipo Ecophon Master Matrix / Linóleo	Teto/Pavimento
4 ^a	Tipo Ecophon Hygiene Foodtec / Linóleo	Paredes/Pavimento
5 ^a	Tipo BASWA Phon Base / Tipo Ecophon Hygiene Foodtec / Linóleo	Teto/Paredes/Pavimento

5.1.1 1^a estratégia de intervenção e simulação

Nesta 1^a intervenção optou-se por colocar a solução do tipo BASWA Phon Base. Esta solução é composta por painéis de lã mineral calibrados e de peso reduzido, que são colados com argamassa especifica sobre tetos maciços ou suspensos em gesso cartonado. O acabamento é feito através do barramento de massa mineral ficando um acabamento tipo estanhado e idêntico ao existente. Esta solução apesar de, esteticamente ser interessante e podendo ser aplicada diretamente ao suporte, em termos económicos é dispendiosa em relação por exemplo, à solução de teto em gesso perfurado com isolamento. Na figura 5.1 está representado o esquema construtivo da solução, em que a espessura da mesma poderá variar entre os 30mm e 70mm.

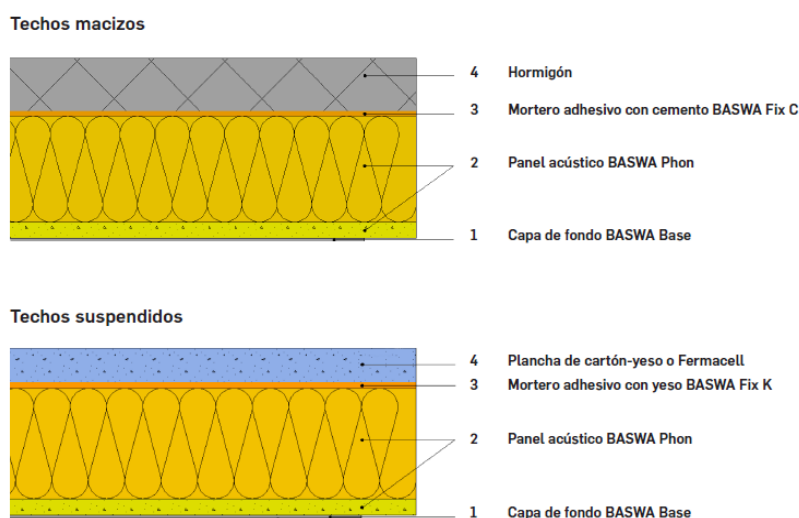


Figura 5.1 – Esquema construtivo BASWA Phon Base (BASWA)

Neste caso, foi escolhida a opção com esquema de espessura 50mm sobre o teto suspenso em gesso cartonado liso existente e sobre a viga existente em betão. Os coeficientes de absorção sonora deste sistema e do pavimento de linóleo são apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Valores dos coeficientes de absorção da 1ª estratégia de intervenção

Solução construtiva	Coeficientes de absorção para cada banda de frequência					
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Tipo BASWA Phon Base (Maciço)	0.50	0.60	0.95	0.9	0.80	0.75
Tipo BASWA Phon Base (Tetos suspensos)	0.20	0.80	0.95	0.85	0.80	0.75
Pavimento de linoleum	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02

De seguida serão apresentados os resultados após a alteração dos valores dos coeficientes de absorção no programa, englobando os resultados do modelo calibrado e da medição possibilitando assim a comparação.

Tabela 5.3 – Resultados T_{30} obtidos da 1ª estratégia de intervenção

Bandas de frequência (Hz)	T_{30}
125	1.28
250	0.90
500	0.91
1000	0.86
2000	0.78
4000	0.72

Tabela 5.4 – Resultados obtidos de D_{50} (500-2000Hz), RASTI e STI da 1ª estratégia de intervenção

	D_{50} (500-2000Hz) (%)	RASTI (%)	STI (%)
1ª intervenção	74	66	68

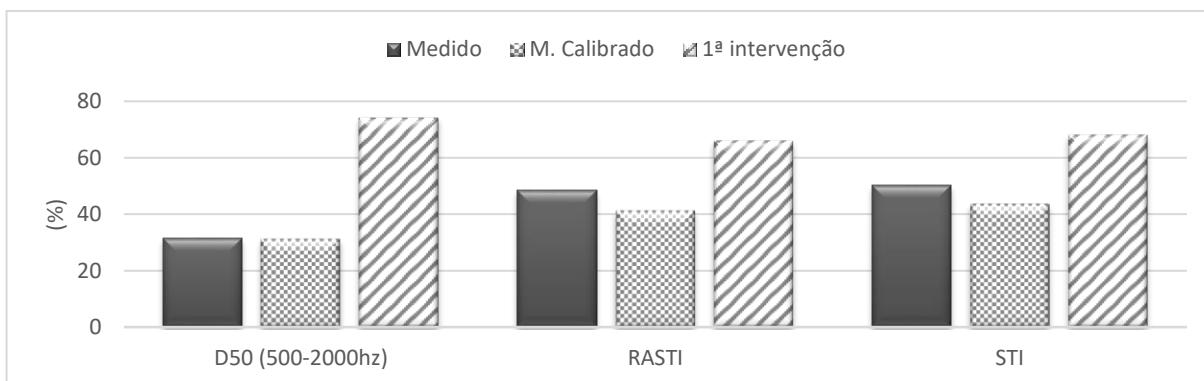
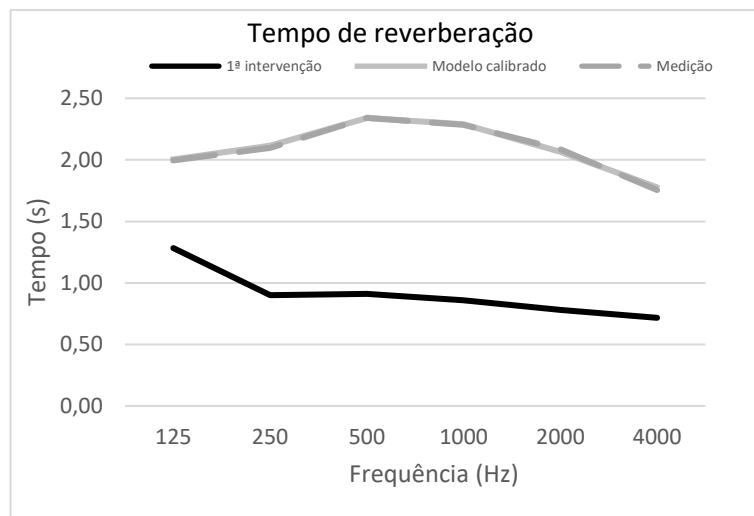


Figura 5.2 – Resultados obtidos da 1ª intervenção vs. modelo calibrado vs. medição

Com esta 1ª estratégia de intervenção, que contemplou a aplicação de uma solução construtiva no teto do refeitório é notório a grande melhoria dos valores em todos os parâmetros acústicos.

5.1.2 2ª estratégia de intervenção e simulação

Na 2ª intervenção optou-se por colocar a solução do tipo Knauf. Esta solução é composta por placas de gesso cartonado com perfuração circular retilínea 8/18R, suspensas no teto a uma distância de 200mm e com isolamento com lã mineral conforme figura 5.3.

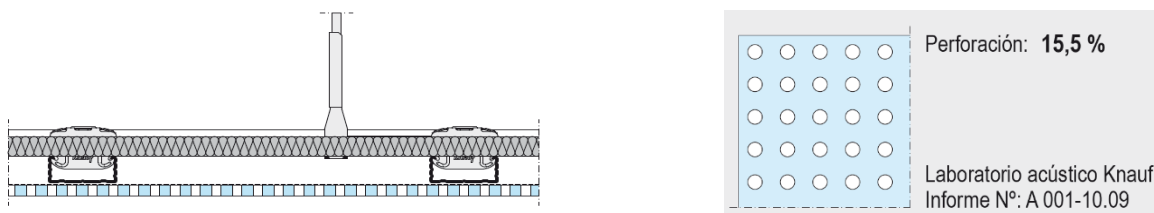


Figura 5.3 – Esquema construtivo teto acústico Knauf Cleaneo (KNAUF)

Os coeficientes de absorção sonora deste sistema e do pavimento de linóleo são apresentados na tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Valores dos coeficientes de absorção da 2ª estratégia de intervenção

Solução construtiva	Coeficientes de absorção para cada banda de frequência					
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Tipo Knauf Cleaneo	0.50	0.65	0.70	0.65	0.60	0.70
Pavimento de linoleum	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02

De seguida são apresentados os resultados após a alteração dos valores dos coeficientes de absorção no programa, englobando os resultados do modelo calibrado e da medição possibilitando assim a comparação.

Tabela 5.6 – Resultados T_{30} obtidos da 2ª estratégia de intervenção

Bandas de frequência (Hz)	T_{30}
125	1.24
250	1.02
500	0.98
1000	0.92
2000	0.87
4000	0.80

Tabela 5.7 – Resultados obtidos de D_{50} (500-2000Hz), RASTI e STI da 2ª estratégia de intervenção

	D_{50} (500-2000Hz) (%)	RASTI (%)	STI (%)
2ª intervenção	68	63	65

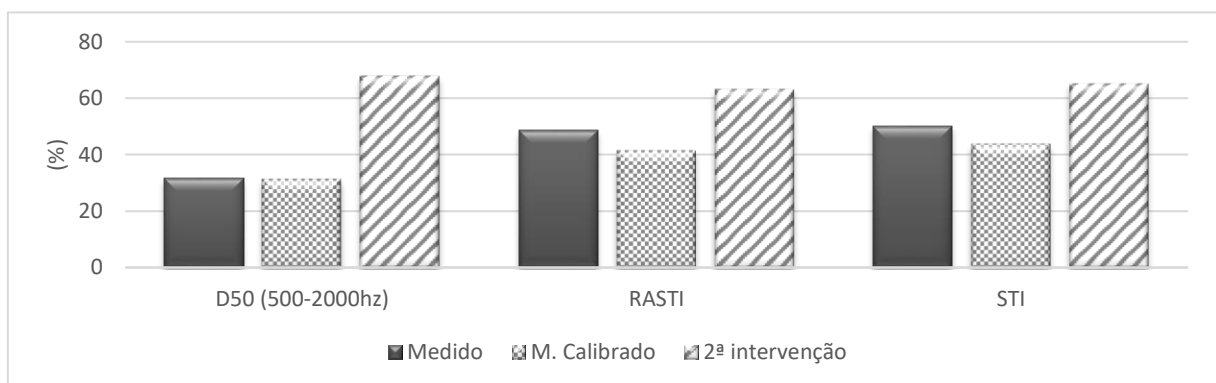
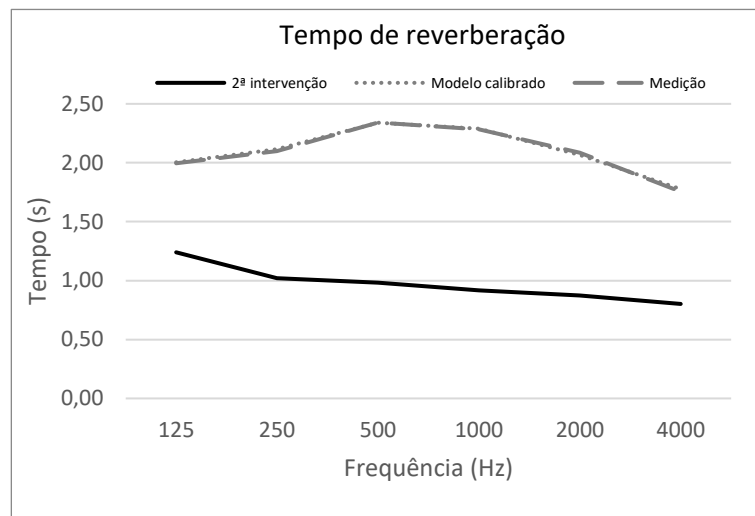


Figura 5.4 – Resultados obtidos da 2ª intervenção vs. modelo calibrado vs. medição

5.1.3 3ª estratégia de intervenção e simulação

Como referenciado na tabela 5.1, para a 3ª estratégia de intervenção foi escolhida a solução construtiva tipo Ecophon Master Matrix. Esta solução consiste em painéis absorventes suspensos no teto a uma distância de 250mm, com filas de módulos de quatro painéis (1200x1040mm) distanciados de 40mm.

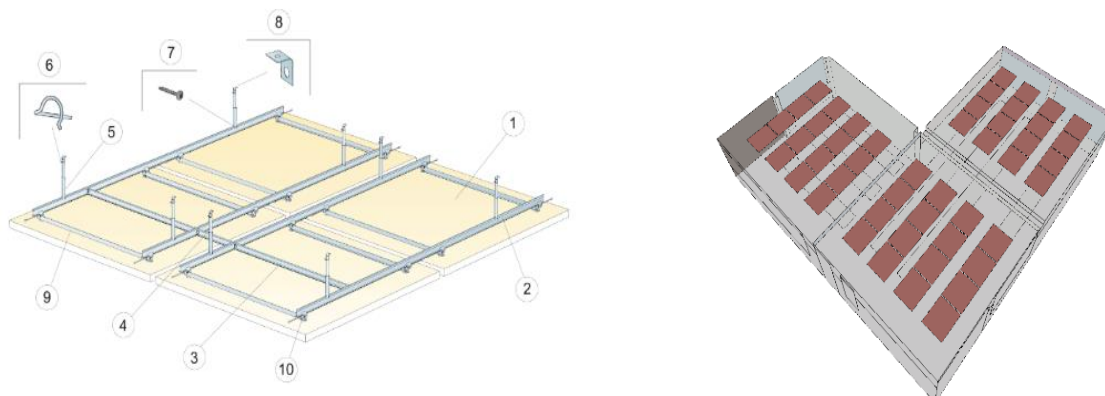


Figura 5.5 – Esquema construtivo Ecophon Master Matrix (à esquerda) (Ecophon Group) e disposição dos painéis no CATT – ACOUSTIC™ (à direita)

Os coeficientes de absorção sonora deste sistema e do pavimento de linóleo são apresentados na tabela 5.8. De ressaltar que os coeficientes de absorção foram obtidos através da área equivalente de absorção anunciada pelo fabricante e correspondem a cada face dos painéis.

Tabela 5.8 – Valores dos coeficientes de absorção da 3ª estratégia de intervenção

Solução construtiva	Coeficientes de absorção para cada banda de frequência					
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Tipo Ecophon Master Matrix	0.14	0.46	0.60	0.75	0.72	0.69
Pavimento de linoleum	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02

De seguida serão apresentados os resultados após a alteração dos valores dos coeficientes de absorção no programa, englobando os resultados do modelo calibrado e da medição, possibilitando assim a comparação.

Tabela 5.9 – Resultados T_{30} obtidos da 3ª estratégia de intervenção

Bandas de frequência (Hz)	T_{30}
125	1.65
250	1.25
500	1.14
1000	1.03
2000	0.96
4000	0.87

Tabela 5.10 – Resultados obtidos de D_{50} (500-2000Hz), RASTI e STI da 3ª estratégia de intervenção

	D_{50} (500-2000Hz) (%)	RASTI (%)	STI (%)
3ª intervenção	58	58	60

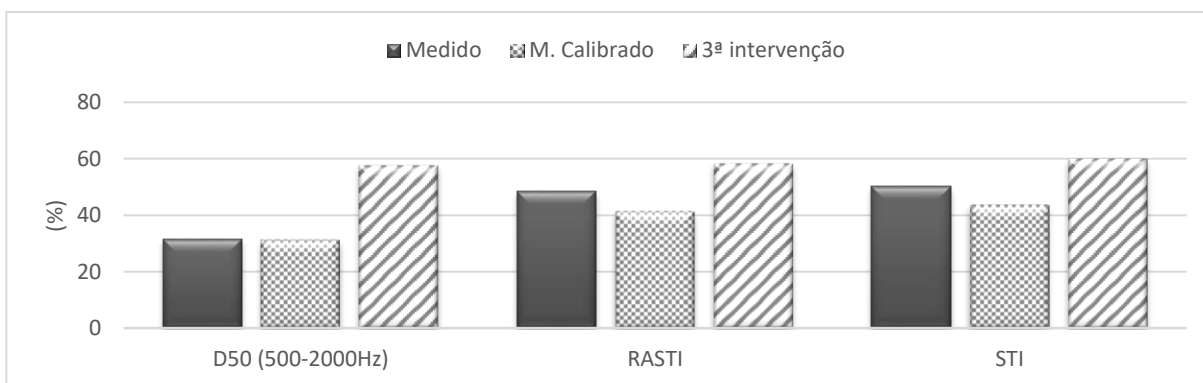
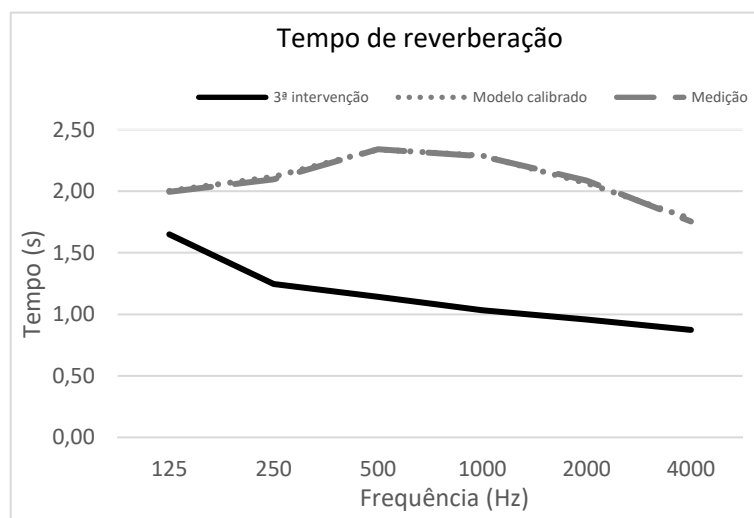


Figura 5.6 – Resultados obtidos da 3ª intervenção vs. modelo calibrado vs. medição

5.1.4 4ª estratégia de intervenção e simulação

Na 4ª estratégia de intervenção foi definido que a solução construtiva a adotar, seria nas paredes. Nesse sentido optou-se pela solução do tipo Ecophon Hygiene Foodtec Wall que consiste num

sistema de painéis de parede absorventes destinado a ambientes, onde é necessário a limpeza frequente e exista risco de impacto mecânico. Os painéis têm no seu núcleo lã de vidro de alta densidade e são protegidos em ambas as faces com Akutex™ HS, tendo a espessura de 40mm. Os mesmos são colocados a 40mm da parede, permitindo assim a circulação de ar e favorecimento da limpeza.



Figura 5.7 – Esquema construtivo Ecophon Hygiene Foodtec Wall (Ecophon Group)

A simulação foi feita tendo em conta a aplicação destes painéis nas paredes indicadas (linha azul) na figura 5.8 de forma a serem evitados paralelismos.

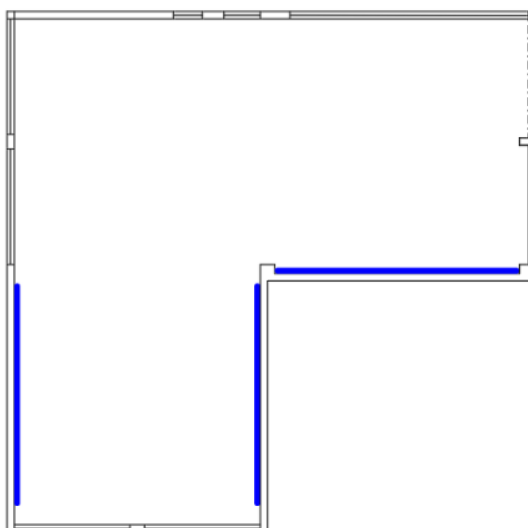


Figura 5.8 - Localização dos painéis Ecophon Hygiene Foodtec Wall da 4ª estratégia de intervenção

Os coeficientes de absorção sonora deste sistema e do pavimento de linóleo são apresentados na tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Valores dos coeficientes de absorção da 4ª estratégia de intervenção

Solução construtiva	Coeficientes de absorção para cada banda de frequência					
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Tipo Ecophon Hygiene Foodtec Wall	0.14	0.46	0.60	0.75	0.72	0.69
Pavimento de linoleum	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02

De seguida serão apresentados os resultados após a alteração dos valores dos coeficientes de absorção no programa, englobando os resultados do modelo calibrado e da medição, possibilitando assim a comparação.

Tabela 5.12 – Resultados T_{30} obtidos da 4ª estratégia de intervenção

Bandas de frequência (Hz)	T_{30}
125	1.31
250	1.04
500	1.00
1000	1.03
2000	0.99
4000	0.96

Tabela 5.13 – Resultados obtidos de D_{50} (500-2000Hz), RASTI e STI da 4ª estratégia de intervenção

	D_{50} (500-2000Hz) (%)	RASTI (%)	STI (%)
4ª intervenção	58.74	59.50	60.67

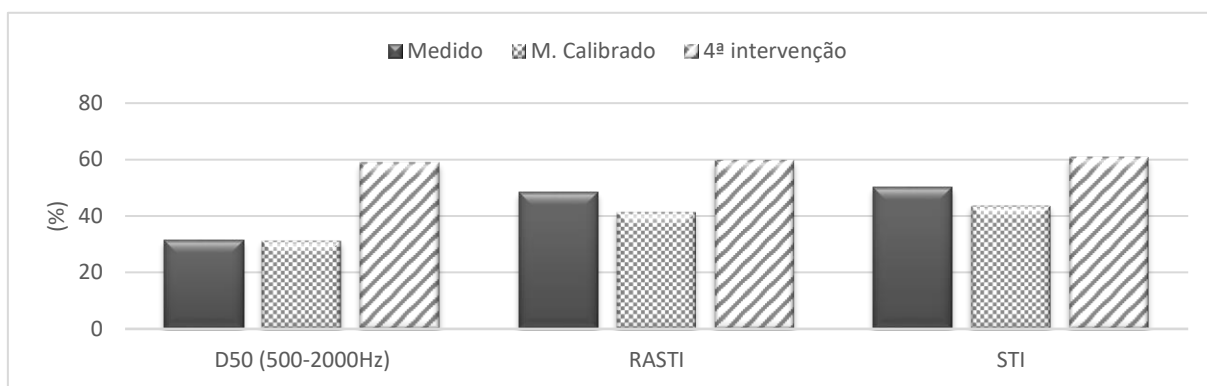
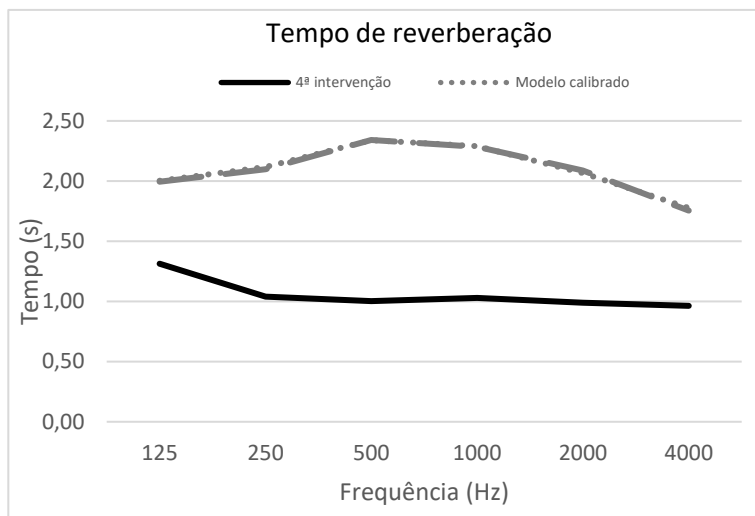


Figura 5.9 – Resultados obtidos da 4ª intervenção vs. modelo calibrado vs. medição

5.1.5 5ª estratégia de intervenção e simulação

A 5ª estratégia de intervenção como referenciado no início do capítulo, foi considerada a melhor solução para os tetos aliada à solução das paredes, ou seja, a solução generalizada foi a BASWA Phon Base + Tipo Ecophon Hygiene Foodtec, além do pavimento de linóleo. Com os valores dos coeficientes de absorção sonora apresentados nas respectivas estratégias de intervenção, os resultados obtidos são apresentados de seguida.

Tabela 5.14 – Resultados T_{30} obtidos da 5ª estratégia de intervenção

Bandas de frequência (Hz)	T_{30}
125	0.85
250	0.54
500	0.36
1000	0.43
2000	0.39
4000	0.40

Tabela 5.15 – Resultados obtidos de D_{50} (500-2000Hz), RASTI e STI da 5ª estratégia de intervenção

	D_{50} (500-2000Hz) (%)	RASTI (%)	STI (%)
5ª intervenção	90	78	80

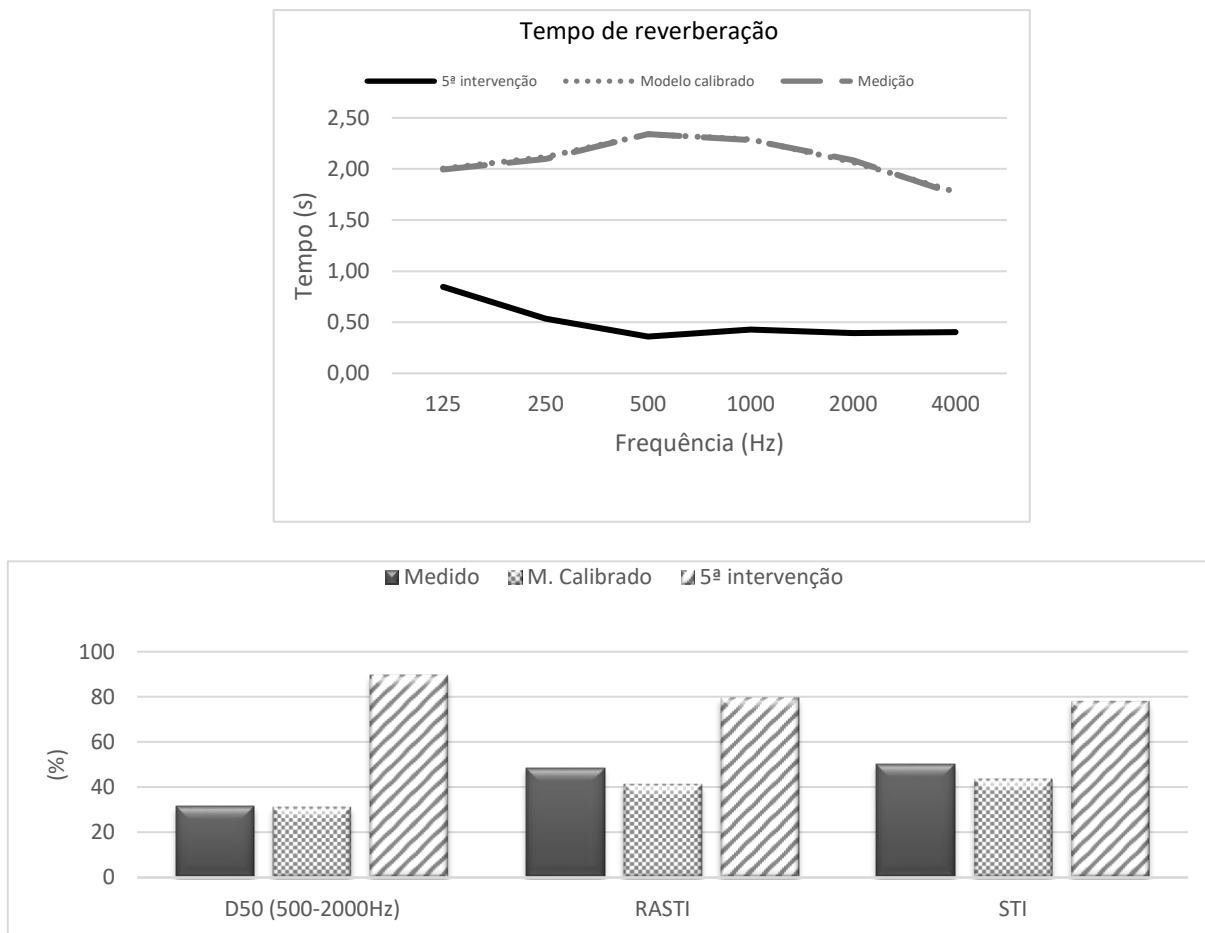


Figura 5.10 – Resultados obtidos da 5ª intervenção vs. modelo calibrado vs. medição

5.2 Análise de resultados

Realizadas as simulações e obtidos os resultados, será feita uma análise dos mesmos. Na tabela 5.16 está representado resumo dos resultados obtidos das simulações de modo a auxiliar a análise.

Tabela 5.16 – Resumos dos resultados obtidos das simulações

	T_r média (500-1000-2000Hz) (s)	D_{50} (500-2000Hz) (%)	STI (%)	RASTI (%)
Medido	2.25	31	50	48
Modelo calibrado	2.23	31	44	41
1ª estratégia de intervenção	0.85	74	68	66
2ª estratégia de intervenção	0.92	68	65	63
3ª estratégia de intervenção	1.04	58	60	58
4ª estratégia de intervenção	1.01	59	61	60
5ª estratégia de intervenção	0.39	90	80	78

Como referenciado no capítulo 3.4 o tempo de reverberação imposto pelo RRAE terá de ser menor ou igual que 1.13s. Pode-se constatar que qualquer uma das estratégias de intervenção sugeridas cumprem esse requisito, sendo que três delas apresentam valores de tempo reverberação abaixo do 1s.

Relativamente à 5ª estratégia de intervenção, trata-se de uma solução limite originada pelo conjunto da 1ª e 2ª estratégia de intervenção, apresentando um valor de T_r bastante baixo, o que torna a estratégia acusticamente interessante, mas dificilmente aplicável a uma situação real. No que respeita aos parâmetros que permitem inteligibilidade da palavra e começando pelo parâmetro D_{50} (500-2000Hz), poder-se-á verificar que os resultados obtidos das várias estratégias são satisfatórios. Segundo mencionado no capítulo 2.2.4 este parâmetro deveria ser geralmente superior a 50%, o que se verifica. Também é visível que o mesmo aumentou com a diminuição do tempo de reverberação, como era expectável.

No que concerne ao parâmetro STI, apesar da divergência dos valores medidos e do modelo calibrado, foi feita a análise tendo em conta o modelo. As introduções das estratégias de intervenção conduzem a um acréscimo do valor de STI na ordem entre 16.5% e 36% que segundo o descrito na tabela 2.3, a avaliação passaria de pobre para aceitável e boa.

5.3 Níveis de pressão sonora

No condicionamento acústico além da problemática do tempo de reverberação, também é importante que os níveis de pressão sonora sejam baixos de modo a existir conforto acústico. Estes dois parâmetros estão interligados na medida em que, quando se está num local com tempos de reverberação baixos, as pessoas tendem conscientemente a baixar o seu tom de voz.

No caso em estudo além da mesma apresentar valor alto para o tempo de reverberação, também apresenta um excessivo valor do nível de pressão sonora. Com a implementação das estratégias de intervenção e realizadas as simulações numéricas, foi possível perceber qual o benefício das mesmas. Na mesma linha com recurso ao programa CATT – ACOUSTIC™ é possível saber à priori qual será a previsão de redução do nível de pressão sonora. O processo foi feito recorrendo a uma fonte sonora com uma certa potência sonora na qual foi medido o LA_{eq} do modelo calibrado. Para a 5ª estratégia de intervenção obteve-se um decréscimo de aproximadamente 10 dB. Este resultado significa que o LA_{eq} medido em *in-situ*, cujo valor foi de 86,5dB(A), passaria assim para 76,5dB(A), ficando assim abaixo do nível de exposição diária. Por outro lado, a 2ª estratégia de intervenção seria eventualmente a solução a adotar e o decréscimo seria de 6.5dB, resultando num previsível LA_{eq} de 80 dB(A). Esta previsão permitiria igualar o valor limite de exposição diária.

Por outro lado, num compartimento fechado a previsão do nível de pressão sonora médio na presença de uma fonte sonora com potência L_w pode ser dado pela equação:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{T_r}{V} \right) + 14dB \quad (12)$$

Ou seja, para prever a redução do nível de pressão sonora pode dado pela equação 13. (Tadeu et al, 2007)

$$L_{p_inicial} - L_{p_final} = 10 \log \left(\frac{T_{r_inicial}}{T_{r_final}} \right) \quad (13)$$

Sendo assim com o valor $T_{r_inicial}$ medido *in-situ* e o valor T_{r_final} obtido da 2ª e 5ª estratégia de intervenção, a redução do nível de pressão sonora seria respetivamente:

$$L_{p_inicial} - L_{p_final} = 10 \log \left(\frac{2,25}{0,92} \right) \cong 4dB \quad (14)$$

$$L_{p_inicial} - L_{p_final} = 10 \log \left(\frac{2,25}{0,39} \right) \cong 8dB \quad (15)$$

Era previsível esta diferença entre a previsão teórica e a previsão do modelo numérico, sendo o mais realista referente ao da simulação.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Considerações finais

Esta dissertação teve como objetivo a avaliação do desempenho acústico de três refeitórios pertencentes ao Município da Lousã, designadamente a Escola Básica nº1 e nº2 da Lousã e a Escola Básica/Jardim de Infância Santa Rita. Estes são locais onde os alunos disfrutam das suas refeições e naturalmente aproveitam para conviver, resultando em espaços propícios à geração de elevados níveis de ruído que aliado aos revestimentos rígidos tipicamente usados nestes locais que geram bastantes reflexões, tornam o espaço desconfortável.

Noutro sentido a introdução de soluções construtivas com vista ao melhoramento do conforto acústico nestes tipos de espaços, tem as suas limitações, consequência das exigências de higiene e além disso tratando-se de reabilitação acústica, existe também a questão do condicionamento do espaço já existente.

No que respeita aos parâmetros acústicos, existe legislação que limita o valor máximo do tempo de reverberação nos refeitórios escolares e por outro lado a inteligibilidade da palavra também tem um papel importante no sentido em que, a comunicação não só entre alunos, mas também entre auxiliares de educação e alunos, terá que ser perceptível de modo prevenir eventuais acidentes.

A partir de medições acústicas nos três refeitórios foi possível a analisar o condicionamento acústico daqueles espaços, concluindo-se que apenas o refeitório da EB1 da Lousã cumpria os requisitos regulamentares impostos pela legislação para o tempo de reverberação. Este cumprimento provavelmente está relacionado com o facto desta escola ter sido construída recentemente. Apesar de, já existirem requisitos acústicos regulamentares em vigor desde 1987, aplicáveis a edifícios escolares, infelizmente só recentemente é que estes passaram a ser efetivamente considerados na generalidade dos projetos de escolas.

Em relação aos outros dois refeitórios (EB2 e EB/JI Santa Rita) constatou-se que os mesmos exibem valores elevados tempos de reverberação, não cumprindo a legislação. Nesses mesmos refeitórios foi possível constatar que os níveis de pressão sonora medidos são bastantes elevados, tornando aqueles espaços bastantes desconfortáveis. As medições dos parâmetros D_{50} e RASTI/STI no refeitório da EB2 da Lousã, permitiram concluir que os valores medidos estão abaixo do pretendido, resultando assim numa inteligibilidade pobre.

Para permitir a avaliação do condicionamento acústico do refeitório da EB2 com a introdução de soluções construtivas, criou-se de um modelo numérico no programa CATT – ACOUSTIC™ que foi inicialmente calibrado tendo em conta os resultados medidos. Foram apresentadas cinco estratégias de intervenção, sendo três delas para o teto, uma para as paredes e outra referente à melhor solução para o teto em conjunto com a solução para as paredes. Das soluções para o teto, apenas uma obrigaria à remoção da solução existente sendo que as restantes poderiam ser aplicadas ao suporte existente, tal como sucederia com a solução para as paredes.

Foi possível concluir que a introdução de qualquer uma das estratégias propostas, o espaço passaria a cumprir os requisitos regulamentares, sendo a proposta mais eficiente também a mais dispendiosa e inviável.

No que respeita aos parâmetros da inteligibilidade da palavra, concluiu-se que melhoram passando para uma inteligibilidade aceitável ou até mesmo boa.

Por outro lado, a solução referente à 2ª estratégia de intervenção será à partida a mais económica e consequentemente a escolha a adotar. Esta solução permitiria cumprir o requisito regulamentar do tempo de reverberação, atenuando igualmente o nível de pressão sonora para o valor limite de exposição diária. Com esta estratégia de intervenção a avaliação subjetiva da inteligibilidade estaria na fronteira entre aceitável/boa. Tendo em conta também a tabela 2.1, para a $SNR = -3$ o nível de pressão sonora ambiente teria de estar no intervalo entre 71 e 83 dB para distâncias de comunicação de 0.5m a 1.0m concluindo-se que, com a previsão da redução na ordem dos 6dB passaria a estar dentro do intervalo aceitável.

A realização deste estudo tal como outros semelhantes, evidenciou uma vez mais que, de uma forma generalizada os refeitórios escolares não cumprem os requisitos regulamentares para os tempos de reverberação, sendo espaços um pouco menosprezados. Concluiu-se que para além da previsão de T_r na fase de projeto, deveria haver uma medição após a execução de forma a verificar os valores de previsão. Por outro lado, no que respeita aos níveis de pressão sonora a inexistência de legislação que limite os níveis de ruído é uma lacuna dado que os valores medidos no estudo são elevados e apesar da exposição não ser prolongada, provoca desconforto, afeta a inteligibilidade da palavra e pode ainda ser um fator originário de problemas de saúde.

Apesar deste estudo se centrar na reabilitação acústica, o mesmo permite obter informações para futuros projetos deste tipo de locais. Comparando o volume por pessoa dos refeitórios da EB1 e EB2 (taxa de ocupação 100%) conclui-se que o rácio é de 3 e 2 m³ respetivamente, ou seja, para locais com capacidade idêntica existe a diferença de 1 m³. Permite assim concluir que deveria haver também uma sensibilização junto das escolas de modo a que existisse uma melhor distribuição dos alunos nas horas das refeições, possibilitando uma distribuição mais homogénea que beneficiaria na redução dos níveis de ruído.

6.2 Trabalhos futuros

Para desenvolvimentos futuros são propostos trabalhos de continuidade a este estudo nomeadamente:

- Realização de simulações de intervenção para a EB/JI Santa Rita;
- Medição dos níveis de ruído na EB1 e realização de simulações de intervenção;
- Relacionar níveis de ruído com a ocupação do refeitório e relacioná-lo com as faixas etárias;
- Aplicação de uma estratégia de intervenção proposta neste estudo e realizar novas medições permitindo comparar com o modelo numérico;
- Relacionar o ruído fundo dos refeitórios com a inteligibilidade da palavra;
- Devido às lacunas do RRAE para este tipo de espaços, propõe-se a revisão do mesmo com propostas de alguns parâmetros regulamentares, tais como o ruído de fundo, ambiente e a inteligibilidade;

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Antoni Carrión Isbert (1998). “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona

Agência Europeia para a Segurança e Saúde no Trabalho (2005). Revista FACTS, nº56. Relatório do Observatório dos Riscos, Bilbao, ISSN 1681-2166

Alarcão, D., Fafaiol, F., Coelho, J. (2008). “Acústica de salas de aula”. Acústica 2008, 20-22 de Outubro, Universidade de Coimbra, Coimbra

Baswa, Hoja de datos del sistema BASWA Phon Base – Edición 2018/1

Beranek, L. (1996). “Concert and opera Halls – How They Sound”. Acoustical Society of America

Bies, D. e Hansen, C. (1997). “Sound absorption in Enclosures”. Encyclopedia of Acoustics, Volume Three, pp.1115-1128

Building Bulletin 93 - Acoustic Design of Schools: performance standards, February 2015

Cappellari, V. e Cielo, C. (2008). “Características vocais acústicas de alunos pré-escolares”. Revista Brasileira de Otorrinolaringologia 74 (2) Março/Abril 2008: pp. 265-72

Decreto-lei nº 182/2006. Consultado em Novembro de 2018, em <https://dre.pt/>

Documento Básico HR – Protección Frente al Ruido, Setembro 2009

Ecophon Group, Ficha Técnica Ecophon Hygiene Foodtec Wall, created 2019-1-15

Ecophon Group, Ficha Técnica Ecophon Hygiene Master Matrix, created 2019-1-30

Google Maps, www.google.pt/maps, consultado em Dezembro de 2008

ISO 3382-2:2008. Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part 2: Reverberation time in ordinary rooms

Knauf, D12.es Techo Acústico Knauf Cleaneo, 02/2014

Marsico, G., Brambilla, G., Curcuruto, S., Clapiz, M., Betti R. e Riccardi, M. (2008). “Acoustic climate inside a canteen and mitigation solutions”. Acoustics’08 Paris June 29-July 4, Paris

Mateus, D., Marinho, A., Pereira, A. (2012). “Aplicabilidade da Fórmula de Sabine a Espaços com Elevada Absorção Sonora: Proposta Prévia de Correção de Coeficientes de Absorção Sonora, VIII Congresso Ibero-americano de Acústica, Évora

Mateus, Diogo (2009). “Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído”. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra

Mateus, D. (2017). “Apontamento das Aulas de AAPAEF – MEAECS”. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra

Organização Internacional do Trabalho (2009). “O Ruído no Trabalho”. Genebra

Pinho, P., Pinto, M., Almeida, R., Lopes, S. e Lemos, L. (2014). “Avaliação do ruído em refeitórios escolares”. TecniAcustica, Murcia

RAAE – “Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios”, aprovado pelo Decreto-Lei nº129/2002 de 11/05, com nova redação dada pelo Decreto-Lei nº 96/2008 de 09/06

Reboredo, E. (2008). “Comportamento acústico de locais de restauração”. Dissertação Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro

Rindel, J. (2012). “Acoustical capacity as a mean noise control in eating establishments”. Baltic-Nordic Acoustics Meeting 18th-20th 2012, Odense, Denmark

Rindel, J. (2018). “Suggested acoustical requirements for restaurants, canteens, and cafeterias”. Baltic-Nordic Acoustics Meeting 15-18 April 2018, Haroa, Reykjavik, Iceland

Tadeu, A., Mateus, D., António, J., Godinho, L., Mendes, P. (2007). “Acústica Aplicada”. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra

World Health Organization (1999). Guidelines for Community Noise.
<http://www.who.int/phe/en/>

Zelem, L., Chmelik, V., Urbán, D. e Rychtáriková, M. (2015). “Analysis of the Acoustic Conditions in the Student Restaurant. EuroNoise 2015, Maastricht