

CLÁUDIA DA SILVA OLIVEIRA

Licenciada em Ciências de Engenharia Mecânica

MELHORAMENTO DAS CONDIÇÕES ACÚSTICAS NUM ESPAÇO DE RESTAURAÇÃO

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Novembro, 2023

MELHORAMENTO DAS CONDIÇÕES ACÚSTICAS NUM ESPAÇO DE RESTAURAÇÃO

CLÁUDIA DA SILVA OLIVEIRA

Licenciada em Ciências de Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Daniel Cardoso Vaz

Professor Auxiliar, NOVA School of Science & Technology

Coorientador: Doutor Alberto José Antunes Marques Martinho

Professor Auxiliar, NOVA School of Science & Technology

Júri

Presidente: Doutor Luís Miguel Chagas Costa Gil

Professor auxiliar, NOVA School of Science & Technology

Vogais: Doutor Tiago Alexandre Narciso da Silva

Professor auxiliar, NOVA School of Science & Technology

Doutor Miguel António Lopes de Matos Neves

Professor auxiliar, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa

Doutor Daniel Cardoso Vaz

Professor auxiliar, NOVA School of Science & Technology

Melhoramento das condições acústicas num espaço de restauração

Copyright © Cláudia da Silva Oliveira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dedico aos meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Daniel Vaz agradeço todo o apoio, ajuda, sabedoria, conselhos e, ainda, as conversas amigas ao longo da realização da dissertação. Ao professor Doutor Alberto Martinho agradeço a partilha de conhecimento, ajuda e disponibilidade durante este período. Aos meus orientadores, um sincero obrigada. Agradeço ainda à professora Doutora Celeste Jacinto pela disponibilidade, partilha de conhecimento na área da acústica e por fornecer os instrumentos fundamentais à realização desta dissertação. Agradeço ao DEMI, a todos os professores e funcionários. Sem eles não teria sido possível concluir a dissertação.

À minha querida mãe Lola, agradeço todo o amor, todo o carinho, todas as palavras de apoio e o ombro sempre pronto para mim. Ao meu querido pai Amadeu, agradeço todo o apoio, todas as piadas de pai e todo o amor. Sem vocês nunca estaria aqui. Aos meus irmãos Bruno e Nádia, agradeço todo o amor, o apoio e todos os momentos de riso. Agradeço à minha tia Guida pela ajuda, apoio e carinho na realização da dissertação. Agradeço às minhas amigas Beatriz Simões e Margarida Palma, pelo apoio e carinho incondicional ao longo destes 5 anos muito felizes. Por último, agradeço ao Francisco pelo ombro e carinho no final de todos os dias e pela ajuda nos dias que foram mais difíceis. Sem ti não teria sido a mesma coisa.

”

«Para hacer las cosas bien es necesario: primero, el amor; segundo, la técnica.»

— **Antoni Gaudí**
(Arquiteto espanhol)

RESUMO

Os espaços de restauração como cantinas escolares e universidades são locais de grande afluência de pessoas e, devido, à falta de elementos de absorção sonora e à quantidade elevada de indivíduos, o ruído torna-se um problema para aqueles que frequentam estes locais. Na Casa do Pessoal, localizado na FCT da UNL, foi percecionado informalmente que o ruído elevado causa desconforto nos funcionários nos horários de maior afluência.

A realização desta dissertação foi fundamental para avaliar de forma objetiva o nível do ruído e desconforto, identificar medidas corretivas existentes no mercado e, ainda, perceber as que têm a melhor relação custo/qualidade. De modo a perceber o impacto do ruído foi realizado um inquérito aos funcionários. Através destas questões compreendeu-se também a perceção ao ruído de cada indivíduo. Para caracterizar o ambiente sonoro efetuaram-se medições do tempo de reverberação que foram comparadas com o valor regulamentar do Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho. Para além disso, efetuaram-se simulações numéricas através do módulo *Harmonic Acoustics* do *Ansys*. Estas simulações tiveram como objetivo comparar os valores obtidos com os valores medidos do SPL, através do sonómetro, em duas posições. Ainda foram realizadas simulações numéricas com medidas corretivas (espumas acústicas, mobília com capacidade de absorção e, ainda, painéis acústicos de materiais naturais e sintéticos) aplicadas, para perceber qual a mais eficiente.

Através da realização do inquérito, para além de se ter obtido o nível de insatisfação e a perceção de cada indivíduo, perceberam-se também as consequências que as fontes sonoras têm nos funcionários. Relativamente a resultados experimentais concluiu-se que os valores medidos do T_{60} pelos métodos do ruído interrompido e do rebentamento do balão são superiores ao limite. Em relação às simulações numéricas percebeu-se que os valores da posição 1 se aproximavam mais à realidade. Para além disso concluiu-se que a solução de atenuação ao ruído que obteve melhores resultados foi a quarta proposta da solução n.º 1: colocação de 32 unidades de espumas acústicas, permitindo a redução do SPL nas posições 1 e 2 para as frequências de 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz.

Concluiu-se que há uma elevada necessidade de realizar o melhoramento das condições acústicas (através do valor do tempo de reverberação obtido), com a possibilidade de aplicar

a solução que apresentou melhores resultados relativamente à atenuação ao ruído.

Palavras-chave: Acústica, ruído, espaço de restauração, medições do som, simulação numérica

ABSTRACT

Dining spaces such as school cafeterias and university canteens are places with a high influx of people, and due to the lack of sound-absorbing elements and the high number of individuals, noise becomes a problem for those who frequent these places. At Casa do Pessoal, located in the FCT at UNL, it was informally perceived that the high noise levels cause discomfort for the staff during peak hours.

The completion of this dissertation was essential to objectively assess the noise level and discomfort, identify corrective measures available in the market, and also understand those with the best cost/quality ratio. To understand the impact of noise, a survey was conducted among the staff. Through these questions, the perception of noise by each individual was also understood. To characterize the sound environment, measurements of the reverberation time were taken and compared with the regulatory value of Decree-Law No. 96/2008 of June 9th. In addition, numerical simulations were conducted using the "Harmonic Acoustics" module of "Ansys." The aim of these simulations was to compare the values obtained with the measured SPL values using a sound level meter in two positions. Numerical simulations with corrective measures (acoustic foam, furniture with absorption capacity, and acoustic panels made of natural and synthetic materials) were also carried out to determine the most efficient solution.

Through the survey, in addition to obtaining the level of dissatisfaction and the perception of each individual, the consequences of sound sources on the staff were also understood. Regarding experimental results, it was concluded that the measured values of TR_{60} using the interrupted noise and balloon burst methods exceeded the limit. As for numerical simulations, it was found that the values in position 1 were closer to reality. Furthermore, it was concluded that the most effective noise attenuation solution was the fourth proposed solution from solution No. 1: placing 32 units of acoustic foam, allowing for the reduction of SPL at positions 1 and 2 for frequencies of 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, and 2000 Hz.

It was concluded that there is a significant need to improve the acoustic conditions (based on the obtained reverberation time value) with the possibility of implementing the solution that yielded the best results in terms of noise attenuation.

Keywords: Acoustic, noise, dining area, sound measurements, numerical simulation

ÍNDICE

Índice de Figuras	xvii
Índice de Tabelas	xxiii
Siglas e Acrónimos	xxv
Símbolos	xxvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e motivação	1
1.2 Estado da arte	2
1.2.1 Estudos experimentais	2
1.2.2 Estudos numéricos	3
1.3 Objetivos	4
1.4 Descrição da organização da dissertação	5
2 Fundamentos Teóricos	7
2.1 Acústica	7
2.1.1 Acústica em espaços interiores	11
2.1.2 Soluções comuns para melhoria da acústica	15
2.1.3 Simulação numérica em Elementos Finitos (<i>Ansys</i>) do campo acústico	17
2.1.4 Equipamentos de medição	19
2.2 O sistema auditivo e os efeitos prejudiciais no ser humano	20
2.3 Legislação	23
3 O espaço a estudar e metodologias experimentais	25
3.1 Caracterização do espaço	25
3.2 Inquérito para caracterização subjetiva da perceção ao ruído	28
3.3 Instrumentação	29

3.4	Regulamento aplicável	35
3.5	Determinação dos parâmetros acústicos	36
3.5.1	Tempo de reverberação	36
3.5.2	Nível de pressão sonora	38
3.5.3	Resposta em frequência	40
4	Modelação numérica	41
4.1	Descrição do modelo	41
4.1.1	Domínio computacional	41
4.1.2	Malha de elementos finitos	42
4.1.3	Coeficientes de absorção	43
4.1.4	Fonte sonora	45
4.1.5	Soluções a obter	45
4.2	Soluções de atenuação de ruído consideradas	46
4.2.1	Escolha das soluções a estudar	46
4.2.2	Aplicação de soluções ao caso de estudo	52
5	Resultados experimentais e discussão	61
5.1	Inquérito para caracterização subjetiva da perceção ao ruído	61
5.2	Tempo de reverberação	64
5.3	Nível de pressão sonora	67
5.4	Resposta em frequência	68
6	Resultados numéricos e discussão	71
6.1	Excitação do campo sonoro sem soluções de atenuação ao ruído aplicadas	71
6.2	Solução n.º 1	74
6.3	Solução n.º 2	77
6.4	Solução n.º 3	80
6.5	Solução n.º 4	83
6.6	Comparação entre soluções	85
7	Conclusão	87
7.1	Conclusões	87
7.2	Sugestões para trabalhos futuros	89
	Referências Bibliográficas	91
	Apêndices	
A	Apêndice	97
A.1	Planta da Casa do Pessoal e dimensões	97
A.2	Banda de frequências das bandas oitava e um terço de oitava	98
A.3	Inquérito realizado aos funcionários da Casa do Pessoal	99

A.4	Gráficos do nível da pressão sonora em função do tempo relativo obtidos para o método do ruído interrompido	101
A.5	Gráficos do nível da pressão sonora em função do tempo relativo obtidos para o método do rebentamento do balão.	104
A.6	Resultados numéricos: Campos sonoros obtidos nas posições 1 e 2 sem solução aplicada.	106

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Onda sonora e respetivas zonas de pressão. Adaptado de [19].	8
2.2	Onda sonora emitida pela voz humana. Adaptado de [21].	8
2.3	Espetro sonoro [20].	9
2.4	Propagação da onda sonora desde a fonte até atravessar o obstáculo [19]. . .	12
2.5	Representação da colocação de um material poroso (2) numa parede (1). . .	16
2.6	Representação da colocação de um material poroso (2) entre a parede (1) e o painel (3).	16
2.7	Representação do ressoador acústico.	17
2.8	Instrumento de medição do nível sonoro, sonómetro [34].	20
2.9	Instrumento de medição na área da acústica, dosímetro [35].	20
2.10	Estrutura do ouvido humano [36].	22
3.1	Materiais sobrepostos nas superfícies.	26
3.2	Paredes envidraçadas do espaço.	27
3.3	Equipamentos existentes no espaço em estudo.	27
3.4	Configuração do sonómetro utilizado.	29
3.5	Resposta relativa das curvas de ponderação A, B e C. Adaptado de [19]. . .	30
3.6	Atenuação das alterações do sinal obtido para as ponderações F e S. Adaptado de [41].	31
3.7	Sonómetro a ser calibrado de modo a ler um valor de 94 dB(A).	32
3.8	Configurações definidas para transmitir ruído cor de rosa aleatório na banda de oitava centrada na frequência de 1000 Hz.	33
3.9	Coluna utilizada nas medições experimentais [42].	34
3.10	Ecrã inicial do programa SE322, mostrando o espaço para representação dos dados obtidos (<i>printscreen</i>).	34
3.11	Posições para a fonte sonora (FS) e para o sonómetro (P1 e P2).	35
3.12	Gráfico a ser obtido de modo a obter o decaimento sonoro. Adaptado de [19].	36
3.13	Exemplo de uma curva de decaimento obtida nas medições experimentais de modo a obter T_{60}	37

3.14	Posição 2 do sonómetro para obtenção do SPL ao longo de um dia de trabalho.	39
4.1	Modelo 3D simplificado do espaço de restauração em estudo, no <i>software SolidWorks</i>	42
4.2	Malha obtida de acordo com as configurações mencionadas.	43
4.3	Gráfico obtido do <i>Ansys Workbench</i> da qualidade ortogonal da malha obtida.	43
4.4	Modelo 3D e localizações da mobília no <i>software SolidWorks</i>	45
4.5	Espuma da empresa SKUM ACOUSTICS [49].	47
4.6	Espuma mais económica em poliuretano da empresa <i>Geepro</i> [51].	48
4.7	Cadeira acolchoada do IKEA [53].	49
4.8	Cortina de algodão do IKEA [51].	49
4.9	Painel Kino Soft da Skum Acoustics [58].	50
4.10	Painel da GIK ACOUSTICS [59].	51
4.11	Paredes onde a espuma da empresa SKUM ACOUSTICS foi colocada nas simulações numéricas.	53
4.12	Representação da espuma acústica MOCKA BT.	53
4.13	Representação das 8 unidades nas paredes do espaço.	54
4.14	Representação das 16 unidades nas paredes do espaço.	54
4.15	Representação das 28 unidades nas paredes do espaço.	55
4.16	Representação das 32 unidades nas paredes do espaço.	55
4.17	Representação da localização das cadeiras acolchoadas e das cortinas.	56
4.18	Representação da localização das cadeiras acolchoadas, das cortinas e dos painéis Kino Soft.	56
4.19	Representação da localização das cadeiras acolchoadas e dos painéis Kino Soft.	57
4.20	Representação da localização dos 25 painéis Kino Soft.	58
4.21	Representação da localização dos 42 painéis de caixas de ovos.	58
4.22	Representação da localização dos 19 painéis Kino Soft e 18 painéis de caixas de ovos.	59
4.23	Representação da localização dos 24 painéis Kino Soft e 13 painéis de caixas de ovos.	59
4.24	Representação da localização dos 27 painéis Kino Soft e 10 painéis de caixas de ovos.	60
4.25	Representação do modelo 3D em que a direção das mesas foi alterada.	60
5.1	Respostas à 2. ^a questão: "Qual é a sua sensibilidade ao ruído nas horas que apresentem um maior número de pessoas presentes no restaurante, ou seja, nas horas de maior ruído?".	61
5.2	Respostas à 3. ^a questão: "Considerando o seu horário de trabalho, indique para cada hora, o valor entre 1 e 5, que represente o desconforto relativamente ao ruído presente no restaurante".	62

5.3	Respostas à 4. ^a questão: "Na sua percepção, selecione a fonte de ruído que mais o/a perturba na hora de maior incomodidade".	63
5.4	Respostas à 5. ^a questão: "Relativamente à fonte de ruído mencionada anteriormente, qual é a sua incomodidade?".	63
5.5	Respostas à 6. ^a questão: "Qual é a sua sensibilidade para a mudança súbita de estado de silêncio para ruído intenso?".	64
5.6	Gráfico SPL vs tempo relativo obtido na medição 2, posição 1 e 500 Hz. . . .	65
5.7	Comparação entre os valores obtidos do T_{60} dos dois métodos e o valor regulamentar	67
5.8	Gráfico obtido no <i>software</i> SE322, durante um dia de trabalho no mês de maio.	68
5.9	Gráfico da resposta em frequência do espaço de restauração em estudo. . .	69
6.1	Comparação dos valores experimentais e numéricos do SPL na posição 1 sem solução de atenuação de ruído aplicada.	72
6.2	Comparação dos valores experimentais e numéricos do SPL na posição 2 sem solução de atenuação de ruído aplicada.	72
6.3	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> para uma frequência de 250 Hz. . .	73
6.4	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> para uma frequência de 500 Hz. . .	73
6.5	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> para uma frequência de 1000 Hz. . .	73
6.6	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> para uma frequência de 2000 Hz. . .	74
6.7	Comparação entre os valores obtidos do SPL na posição 1, com e sem solução de atenuação n.º 1 aplicada.	75
6.8	Comparação entre os valores obtidos do SPL na posição 2, com e sem solução de atenuação n.º 1 aplicada.	75
6.9	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> com a proposta 4 da solução 1 aplicada para 250 Hz.	76
6.10	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> com a proposta 4 da solução 1 aplicada para 500 Hz.	76
6.11	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> com a proposta 4 da solução 1 aplicada para 1000 Hz.	76
6.12	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> com a proposta 4 da solução 1 aplicada para 2000 Hz.	77
6.13	Comparação entre os valores obtidos do SPL na posição 1, com e sem solução de atenuação n.º 2 aplicada.	78
6.14	Comparação entre os valores obtidos do SPL na posição 2, com e sem solução de atenuação n.º 2 aplicada.	78
6.15	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> com a proposta 4 da solução 2 aplicada para 250 Hz.	79
6.16	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> com a proposta 4 da solução 2 aplicada para 500 Hz.	79

6.17	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> com a proposta 4 da solução 2 aplicada para 1000 Hz.	79
6.18	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> com a proposta 4 da solução 2 aplicada para 2000 Hz.	80
6.19	Comparação entre os valores obtidos do SPL na posição 1, com e sem solução de atenuação n.º 3 aplicada.	81
6.20	Comparação entre os valores obtidos do SPL na posição 2, com e sem solução de atenuação n.º 3 aplicada.	81
6.21	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> com a proposta 4 da solução 3 aplicada para 250 Hz.	82
6.22	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> com a proposta 4 da solução 3 aplicada para 500 Hz.	82
6.23	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> com a proposta 4 da solução 3 aplicada para 1000 Hz.	82
6.24	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> com a proposta 4 da solução 3 aplicada para 2000 Hz.	83
6.25	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> com a solução 4 aplicada para 250 Hz.	84
6.26	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> com a solução 4 aplicada para 500 Hz.	84
6.27	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> com a solução 4 aplicada para 1000 Hz.	84
6.28	Campo sonoro obtido no <i>software Ansys</i> com a solução 4 aplicada para 2000 Hz.	85
A.1	Planta do espaço de restauração estudado.	97
A.2	Primeira página do inquérito realizado aos funcionários.	99
A.3	Segunda página do inquérito realizado aos funcionários.	100
A.4	Decaimento do SPL para medição 1, posição 1 e 500 Hz.	101
A.5	Decaimento do SPL para medição 2, posição 1 e 500 Hz.	101
A.6	Decaimento do SPL para medição 1, posição 2 e 500 Hz.	101
A.7	Decaimento do SPL para medição 2, posição 2 e 500 Hz.	102
A.8	Decaimento do SPL para medição 1, posição 1 e 1000 Hz.	102
A.9	Decaimento do SPL para medição 2, posição 1 e 1000 Hz.	102
A.10	Decaimento do SPL para medição 1, posição 2 e 1000 Hz.	102
A.11	Decaimento do SPL para medição 2, posição 2 e 1000 Hz.	103
A.12	Decaimento do SPL para medição 1, posição 1 e 2000 Hz.	103
A.13	Decaimento do SPL para medição 2, posição 1 e 2000 Hz.	103
A.14	Decaimento do SPL para medição 1, posição 2 e 2000 Hz.	103
A.15	Decaimento do SPL para medição 2, posição 2 e 2000 Hz.	104
A.16	Decaimento do SPL para medição 1 e posição 1, segundo o método do rebentamento do rebentamento do balão.	104

A.17 Decaimento do SPL para medição 2 e posição 1, segundo o método do rebentamento do balão.	104
A.18 Decaimento do SPL para medição 1 e posição 2, segundo o método do rebentamento do balão.	105
A.19 Decaimento do SPL para medição 2 e posição 2, segundo o método do rebentamento do balão.	105
A.20 Campo sonoro obtido na posição 1 sem solução aplicada para 250 Hz. . . .	106
A.21 Campo sonoro obtido na posição 2 sem solução aplicada para 250 Hz. . . .	106
A.22 Campo sonoro obtido na posição 1 sem solução aplicada para 500 Hz. . . .	106
A.23 Campo sonoro obtido na posição 2 sem solução aplicada para 500 Hz. . . .	106
A.24 Campo sonoro obtido na posição 1 sem solução aplicada para 1000 Hz. . . .	107
A.25 Campo sonoro obtido na posição 2 sem solução aplicada para 1000 Hz. . . .	107
A.26 Campo sonoro obtido na posição 1 sem solução aplicada para 2000 Hz. . . .	107
A.27 Campo sonoro obtido na posição 2 sem solução aplicada para 2000 Hz. . . .	107

ÍNDICE DE TABELAS

2.1	Valores limite de acordo com o critério de incomodidade [37].	23
3.1	Dados do espaço de restauração retirados da sua planta.	25
3.2	Descrição dos objetivos das questões do questionário.	29
3.3	Valores fundamentais definidos pela legislação para o tempo de reverberação.	35
4.1	Propriedades do ar consideradas nas simulações numéricas.	42
4.2	Coeficientes de absorção em função da frequência para simulação numérica.	44
4.3	Valores da pressão sonora para excitação do campo sonoro.	45
4.4	Intervalo do SPL mais adequado, aceitável e inaceitável para um espaço de restauração [7].	46
4.5	Coeficientes de absorção dos materiais considerados para medidas corretivas.	51
4.6	Comparação entre as várias soluções propostas.	52
5.1	Resultados do tempo de reverberação na posição 1, segundo o método do ruído interrompido.	65
5.2	Resultados do tempo de reverberação médio da posição 1 e 2 para cada frequência e média aritmética final do T_{60} segundo o método do ruído interrompido.	66
5.3	Resultados dos tempo de reverberação obtidos na posição 1 e 2 e média aritmética final do T_{60} , segundo o método do rebentamento do balão.	66
5.4	Resultados do nível de pressão sonora a 1,7 m e a 1,0 m da coluna.	68
5.5	Resultados do nível de pressão sonora nas posições 1 e 2, a serem comparados com os resultados numéricos.	68
6.1	Resultados do nível de pressão sonora obtidos por simulações numéricas nas posições 1 e 2.	71
6.2	Resultados do nível de pressão sonora obtidos nas posições 1 e 2, para as quatro propostas da solução n.º 1.	74
6.3	Resultados do nível de pressão sonora obtidos nas posições 1 e 2, para as quatro propostas da solução n.º 2.	77

6.4	Resultados do nível de pressão sonora obtidos nas posições 1 e 2, para as quatro propostas da solução n.º 3.	80
6.5	Resultados do nível de pressão sonora obtidos nas posições 1 e 2, para a solução n.º 4.	83
A.1	Banda de frequências das bandas oitava e um terço de oitava.	98

SIGLAS E ACRÓNIMOS

ANSI	Instituto Nacional de Padrões Americanos (<i>p. 31</i>)
CAD	Computer Aided Design (<i>p. 4</i>)
DAB	Diagonal Active Barrier (<i>p. 3</i>)
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia (<i>p. ix</i>)
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional (<i>p. 31</i>)
IPQ	Instituto Português da Qualidade (<i>p. 29</i>)
ISO	Organização Internacional de Normalização (<i>p. 23</i>)
NP	Norma Portuguesa (<i>p. 23</i>)
NPS	Nível de potência sonora (<i>p. 11</i>)
REW	Room EQ Wizard (<i>p. 32</i>)
RGR	Regulamento Geral do Ruído (<i>p. 23</i>)
RRAE	Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (<i>p. 23</i>)
SPL	Sound pressure level/ nível da pressão sonora (<i>p. 39</i>)
UNL	Universidade Nova de Lisboa (<i>p. ix</i>)

SÍMBOLOS

$1 - \bar{\alpha}$ Fator de redução de energia sonora (*p. 13*)

$\bar{\alpha}$ Absorção média de Sabine (*p. 14*)

c Velocidade do som (m/s) (*pp. 8, 10*)

d Distância média percorrida por uma onda sonora (m) (*p. 13*)

f Frequência (Hz) (*p. 9*)

f_c Frequência central (Hz) (*p. 31*)

f_l Frequência limite inferior (Hz) (*p. 31*)

f_u Frequência limite superior (Hz) (*p. 31*)

h Humidade relativa (*p. 14*)

I Intensidade Sonora (W/m^2) (*p. 10*)

I_{ref} Intensidade de referência ($10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$) (*p. 11*)

L_{eq} Nível da pressão sonora equivalente (dB) (*p. 11*)

L_I Nível da intensidade sonora (dB) (*p. 11*)

L_p Nível da pressão sonora (dB) (*p. 11*)

λ Comprimento de onda (m) (*p. 9*)

n Frequência média de reflexão (Hz) (*p. 13*)

p Pressão sonora (Pa) (*p. 10*)

p_{ref} Pressão de referência ($20 \mu\text{Pa}$) (*p. 11*)

ρ Massa volúmica (kg/m^3) (*p. 10*)

S	Área superficial (m^2) (<i>p. 13</i>)
T_{60}	Tempo de reverberação (s) (<i>p. 12</i>)
u	Velocidade (m/s) (<i>p. 10</i>)
V	Volume (m^3) (<i>p. 12</i>)

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e motivação

Os primeiros registos na história relacionados com a acústica estão associados ao filósofo Pitágoras no século VI a.C., cuja descoberta foi a produção de sons musicais através da vibração de cordas [2]. Posteriormente, Wallace Clement Sabine (1868-1919), um físico verificou que o tempo de reverberação é um parâmetro fundamental para garantir uma boa acústica de um espaço [3]. O significado do tempo de reverberação será abordada e explicada de forma mais pormenorizada no capítulo 2.1.1.

A acústica sempre foi um parâmetro importante na construção de edifícios, como teatros, auditórios, igrejas, entre outros, uma vez que o propósito destes é garantir que o som se propague pelo espaço todo. No entanto, para outro tipo de espaços, como espaços de restauração, fábricas, *shoppings* e lojas, a acústica não foi prioridade e, como consequência, os trabalhadores desses locais começaram a sentir efeitos colaterais. Exemplos destes efeitos originados pela exposição elevada ao ruído são o desconforto, o stress, as perturbações do sono e até mesmo problemas mais graves de saúde, como produção de adrenalina ou hipertensão arterial. Por conseguinte, a melhoria do ambiente acústico começou a ser uma prioridade, o que gerou o rendimento das horas de ofício e até mesmo o contentamento dos clientes.

O melhoramento de ambientes acústicos pode ser feito através da colocação de materiais de elevada absorção, painéis perfurados, mobília ou cortinas. Todas estas opções contribuem para uma melhoria da acústica e, consequentemente, para um maior contentamento das pessoas que estejam no local em causa.

Daí vem a importância de alcançar possíveis soluções para a melhoria da acústica do espaço de restauração em questão, a Casa do Pessoal, localizado no Campus da Faculdade de Ciências e Tecnologia, da Universidade Nova de Lisboa. Numa fase inicial, foram aplicados questionários aos funcionários que afirmaram que o nível de ruído é excessivo nas horas de maior concentração de pessoas, entre as 12h e as 15h, o que provoca desconforto nos mesmos. Perante esta problemática, foi necessário arranjar soluções para diminuir o nível de pressão sonora do espaço nas horas de maior movimento. Deste modo,

o contentamento dos trabalhadores e a rentabilidade do trabalho irão crescer.

1.2 Estado da arte

1.2.1 Estudos experimentais

Relativamente a estudos experimentais, estes focam-se principalmente na avaliação do ambiente acústico em espaços fechados, como por exemplo restaurantes e escritórios. Para além disso, também há estudos de aplicações de soluções em espaços de restauração. Ortins [4] teve como objetivo avaliar a acústica de salas de trabalho *open space* de três empresas. Realizou inquéritos aos trabalhadores e ainda fez a medição do nível sonoro das salas. Através destas duas análises, chegou à conclusão de que era necessário haver um melhoramento da acústica. Meng *et al* [5] realizou um estudo semelhante ao anterior, em que se baseou em inquéritos e medições para perceber o conforto acústico das pessoas nos restaurantes de vários tipos: partilha de um único prato ou de vários pratos pelos consumidores e, ainda, a não partilha de um único prato. Chegou à conclusão de que diferentes tipos de restaurantes influenciam o nível sonoro. Outro estudo semelhante feito por Tarlaio *et al* [6] baseou-se na realização de inquéritos aos clientes e chegou à conclusão de que o valor do nível sonoro no restaurante influencia principalmente pessoas que apresentem um nível de sensibilidade elevado, aumentando o descontentamento destas.

Relativamente à aplicação de soluções, Fuchs e Lamprecht [7] referem que foi aplicado numa cantina escolar com uma área de 208 m², uma solução muito eficiente a respeito dos seguintes parâmetros: valor do investimento, área ocupada pelo material absorvente, manutenção e renovação. Esta solução baseou-se na colocação de 9 absorventes acústicos em que cada um tinha as dimensões 400 × 500 × 3000 mm nas arestas e nos cantos do espaço. Os resultados foram favoráveis uma vez que se observou a diminuição do tempo de reverberação nas gamas das médias e baixas frequências.

Outro exemplo de aplicações, segundo Fuchs *et al* [8], foi a colocação de 61 painéis acústicos com um tamanho de 1 × 0,75 × 0,1 m diretamente num teto que já era composto por um material acústico (lã mineral). No entanto, apenas o teto não tinha diminuído o ruído de forma eficaz. Deste modo, a cantina com dimensões de 17 × 15 × 3,5 m atingiu um ambiente sonoro em que o ruído reduziu consideravelmente e o conforto das pessoas aumentou.

Fuchs [9] descreve outro caso em que a aplicação de 1 m² de painéis acústicos num espaço de restauração apenas diminuiu o tempo de reverberação para uma gama de frequências inferiores a 200 Hz. Foi necessário então a colocação de estruturas transparentes microperfuradas no teto de betão de forma a atingir a restante gama de frequências (< 200 Hz). Deste modo, houve uma satisfação geral tanto nos funcionários como nos clientes.

Por último, Fuchs [9] refere que, para um restaurante com um volume de 1200 m³, foram colocados 39 m² de um painel acústico próprio para absorção de baixas frequências

nas paredes, 11 m² de paredes móveis feitas de um material poroso e, por fim, 17 m² de paredes móveis feitas do mesmo tipo de painel acústico para as baixas frequências. Deste modo, o tempo de reverberação diminuiu significativamente para toda a gama de frequências, principalmente na de baixas frequências.

Concluiu-se que os estudos de Ortins [4], Meng *et al* [5] e Tarlao *et al* [6] focaram-se principalmente no estudo dos efeitos do nível de ruído elevado, através da realização de inquéritos e, ainda, na avaliação do ambiente acústico dos espaços em questão. No entanto, também foram apresentados casos práticos de Fuchs [7–9] onde foi estudado a aplicação de soluções e os efeitos positivos que estas tiveram nos espaços de restauração.

1.2.2 Estudos numéricos

Relativamente a estudos numéricos relacionados com a avaliação acústica de um espaço fechado, poucos são aqueles que têm como objetivo direto melhorar a acústica de um espaço. A maioria dos estudos realizados baseia-se, principalmente, na criação de modelos na área da acústica. No entanto, nesta secção apresentam-se casos de estudos dos dois tipos.

Realizaram-se estudos para formularem modelos que previssem o nível sonoro no espaço fechado. Por exemplo, Sequeira *et Cortínez* [10] propuseram um modelo bidimensional simplificado baseado na teoria da difusão que tinha como objetivo obter resultados com um tempo de execução muito baixo, o que foi alcançado com sucesso. Liu *et Lu* [11] propuseram um modelo também bidimensional para prever o campo sonoro de um espaço longo com ramificações. Chegaram à conclusão de que a utilização deste modelo não era o suficiente para obter bons resultados. Sugeriram então um método novo que combinasse dois modelos.

O estudo realizado por Tarabini *et Roure* [12] tinha como objetivos principais formular um modelo que permitisse reduzir o nível sonoro numa parede do espaço fechado, compreender a influência dos parâmetros do algoritmo utilizado (DAB) e, por último, perceber a relação entre os parâmetros e a redução do nível sonoro. Os resultados sugeriram que o modelo é válido para futuras utilizações.

De seguida, serão mencionados estudos que se assemelham ao que foi feito nesta dissertação. Um estudo recente e semelhante é o de Szemela *et al* [13]. Este baseou-se no estudo da propagação do som numa estrutura tridimensional, retangular com um teto que apresenta a forma de um quarto de cilindro. O teto é coberto por um material que possui capacidade de absorção. Os investigadores concluíram que os resultados estavam em consonância com a realidade.

Khrystoslavenko *et Grubliauskas* [14] utilizaram o *Software Comsol* para estudar o campo do nível de pressão sonora para várias frequências e concluíram que a pressão sonora é elevada nos cantos e no centro do espaço. Chegaram também à conclusão de que o nível de pressão sonora aumenta desde as frequências baixas até às médias, mas que diminui quando se atingem as frequências altas.

Noutro caso, Jakic [15] fez um modelo CAD do restaurante em estudo e realizou simulações numéricas através do software ODEON com o objetivo de comparar os tempos de reverberação obtidos experimentalmente e numericamente, antes e após a aplicação de soluções, de modo a haver melhoria do ambiente sonoro.

Por último, Li *et al* [16] também realizaram simulações numéricas antes e após a colocação de um candeeiro composto de materiais com capacidade de absorção das ondas sonoras. Compararam em ambas as situações o campo do nível de pressão sonora.

Com esta revisão bibliográfica, pode concluir-se que os estudos feitos por Sequeira *et Cortínez* [10], Liu *et Lu* [11] e Tarabini *et Roure* [12] basearam-se, principalmente, na formulação de modelos numéricos e os estudos feitos por Szemela *et al* [13], Khrystosla-venko *et Grubliauskas* [14], Jakic [15] e Li *et al* [16] focaram-se na comparação do campo do nível de pressão sonora antes e depois das aplicações de medidas corretivas do ambiente acústico.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho com um tema bastante exploratório, foi a identificação das soluções existentes no mercado atual, de forma a perceber a melhor opção que garante o melhoramento do ambiente acústico do espaço em estudo. Para tal, ao longo da dissertação, foram realizadas análises experimentais e numéricas.

A nível experimental foi necessário realizar medições do nível de pressão sonora, em duas posições diferentes no espaço, sem soluções aplicadas. Deste modo, caracterizou-se o espaço de restauração do ponto de vista do campo acústico. Esta caracterização baseou-se na geração de ondas sonoras através de uma fonte nas gamas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz. Estas frequências não só foram escolhidas por estarem inseridas na gama de frequência ouvida pelo ser humano, como também foram selecionadas devido à medição do tempo de reverberação, que será explicado posteriormente.

Realizaram-se simulações numéricas para a mesma situação que a experimental (isto é, sem medidas corretivas aplicadas) e também outras com soluções de atenuação de ruído empregues no espaço com o objetivo de perceber qual a melhor solução. Deste modo, compreende-se a importância da utilização do *software Ansys* e das medições experimentais. Para garantir os melhores resultados, foi fundamental uma descrição rigorosa do espaço, ou seja, foi preciso ter em conta a quantidade do mobiliário existente e o material deste, bem como um levantamento das dimensões e do material do chão, teto e paredes.

Juntamente com as medições e análises numéricas, foram realizados inquéritos aos funcionários, para perceber quais são as horas mais críticas e ainda a sensibilidade de cada um ao ruído neste intervalo de tempo. Pretendeu-se também com este inquérito, compreender de que maneira o ruído afeta os trabalhadores nas horas de trabalho, ou seja, se sentem mais irritabilidade, desconforto ou outros.

As medições foram feitas em dois pontos do espaço de restauração, garantindo que o Decreto-Lei n.º 9/2007, de 17 de janeiro alterado pelo Decreto-Lei n.º 278/2007 de 1 de agosto, foi respeitado. Relativamente ao tempo de reverberação, o valor terá que respeitar o limite estabelecido no Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho.

Compreende-se, então, que o principal objetivo da dissertação foi identificar a solução que melhor se aplica no espaço em questão. Para além disto, através da realização deste trabalho percebeu-se o impacto que o ruído em excesso tem nos funcionários.

1.4 Descrição da organização da dissertação

Neste capítulo encontra-se uma descrição detalhada da estrutura da dissertação, cujo objetivo é garantir uma maior compreensão da leitura desta. A dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos, os quais se baseiam numa introdução, fundamentos teóricos, metodologias experimentais e numéricas, discussão dos resultados experimentais e numéricos e, ainda, as conclusões.

Relativamente ao primeiro capítulo, neste faz-se um enquadramento histórico, mencionando alguns dos acontecimentos mais importantes da área da acústica, como por exemplo, a descoberta do tempo de reverberação. Como será observado, este parâmetro acústico é fundamental para a caracterização do campo sonoro do espaço em estudo. Para além disso, menciona-se a motivação central da realização deste estudo (a insatisfação dos clientes) e, ainda, são mencionados os estudos numéricos e experimentais mais recentes relacionados com a acústica. Por último, descrevem-se os principais objetivos a serem alcançados com a concretização deste estudo: realização de um inquérito, a obtenção do tempo de reverberação e escolher a solução de atenuação de ruído mais viável.

De modo a ocorrer uma melhor compreensão da dissertação, no segundo capítulo considerou-se imprescindível a explicação de alguns conceitos teóricos, como o processo da propagação de ondas sonoras, a definição de tempo de reverberação e do nível de pressão sonora, entre muitos outros. Ainda são mencionadas os tipos de medidas corretivas ao ruído existentes nos dias de hoje e os equipamentos que caracterizam o campo sonoro dos espaços. Para além disso, é explicado o processo para a realização de uma simulação numérica no âmbito da acústica no *software Ansys*. Explora-se também o sistema auditivo e os efeitos negativos que o ruído tem no ser humano, para entender que é fundamental haver boas condições acústicas nos espaços frequentados. Por último, referem-se legislações existentes relativas ao controlo do ruído, com o fim de garantir a saúde da população portuguesa.

No terceiro capítulo está inserida a caracterização do espaço, como os materiais, tipos de equipamento e mobília presentes. Para além disso, encontra-se a descrição do questionário realizado aos funcionários, os instrumentos utilizados para as medições e, ainda, o regulamento aplicável. É de notar que nas secções referentes aos instrumentos e legislação, ambos estão aplicados ao caso prático deste espaço de restauração e não de uma forma mais teórica como no capítulo 2. Por último, são referidos os processos de

medição dos seguintes parâmetros acústicos: tempo de reverberação, nível de pressão sonora e resposta em frequência. Foram feitas medições ao longo das horas de trabalho dos funcionários, com o objetivo de perceber as horas de maior ruído e, ainda, a resposta em frequência do espaço.

As abordagens realizadas no *Software Ansys*, de modo a realizar as simulações numéricas aplicadas no caso em estudo encontram-se no capítulo 4. Neste inserem-se as definições da malha, do domínio computacional e ainda das condições de fronteira. Para além disso, sugerem-se três soluções de atenuação de ruído e como foram aplicadas nas simulações. No capítulo 2 é mencionada a teoria e o processo a realizar de modo a concretizar uma simulação numérica no módulo em causa.

Nos capítulos 5 e 6 analisam-se e discutem-se os resultados obtidos (dos parâmetros acústicos) nas medições e inquérito e, ainda, simulações numéricas, respetivamente. Por último, no capítulo 7 encontram-se as conclusões do estudo e as sugestões para trabalhos futuros, tanto para a realização de medições como para a realização de simulações numéricas.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Acústica

A acústica é a ciência que estuda a geração, propagação e recepção de ondas nos meios elásticos: gasoso, sólido e líquido. Estes meios garantem a geração e a propagação das ondas sonoras através das oscilações vibratórias das partículas do meio. A acústica pode incluir uma vasta gama de frequências: as frequências associadas a uma sensação de som, as frequências do ultrassónico e as frequências do infrassónico [17].

Atualmente, a acústica é um elemento de estudo e de preocupação em várias áreas, como a acústica arquitetónica, acústica musical, engenharia acústica, acústica subaquática, acústica estrutural e de vibrações, acústica física, entre outras [18].

É de extrema importância compreender de forma minuciosa o que é o som e o ruído e as diferenças entre estes dois conceitos.

O som pode ser definido como o movimento de ondas mecânicas no ar ou noutro meio, desde que as frequências que compõem a onda se situem na gama de frequências em que há uma perceção auditiva. Estas ondas são denominadas de ondas sonoras ou ondas acústicas.

As ondas sonoras propagam-se pelo meio compressível devido às diferenças de pressões que ocorrem nas partículas de ar. As partículas propagam a onda através de vibrações, ou seja, pequenas oscilações na direção longitudinal, para a esquerda e para a direita [19, 20]. Naturalmente, as partículas regressam à posição original devido às forças elásticas do ar [19]. Ao ocorrer este movimento de partículas, gera-se a diferença de pressões anteriormente referida, isto é, há uma produção de regiões de compressão e de rarefação [17]. Estas regiões encontram-se com uma pressão ligeiramente acima e abaixo da pressão atmosférica, respetivamente. Quando não há variação de pressão, ocorre o silêncio. A figura 2.1 representa um exemplo de uma onda sonora com apenas uma frequência e amplitude, ou seja, um som puro. Na realidade, as ondas sonoras são compostas por várias frequências e várias amplitudes. Na figura 2.2, encontra-se o exemplo da onda sonora emitida pela voz humana. Como se pode verificar há várias frequências e amplitudes [20].

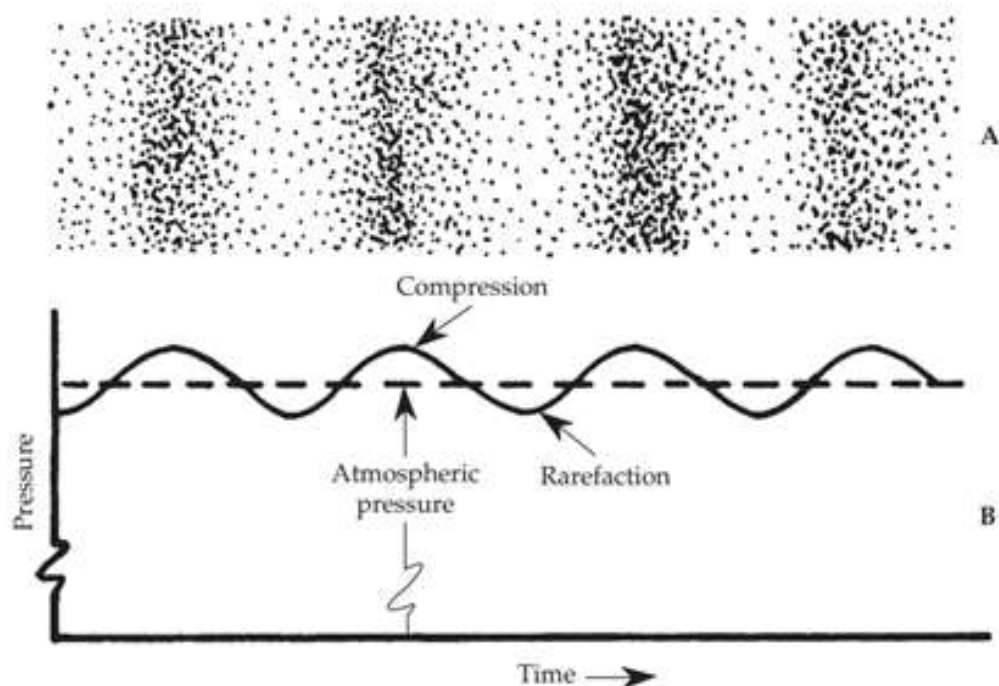


Figura 2.1: Onda sonora e respectivas zonas de pressão. Adaptado de [19].

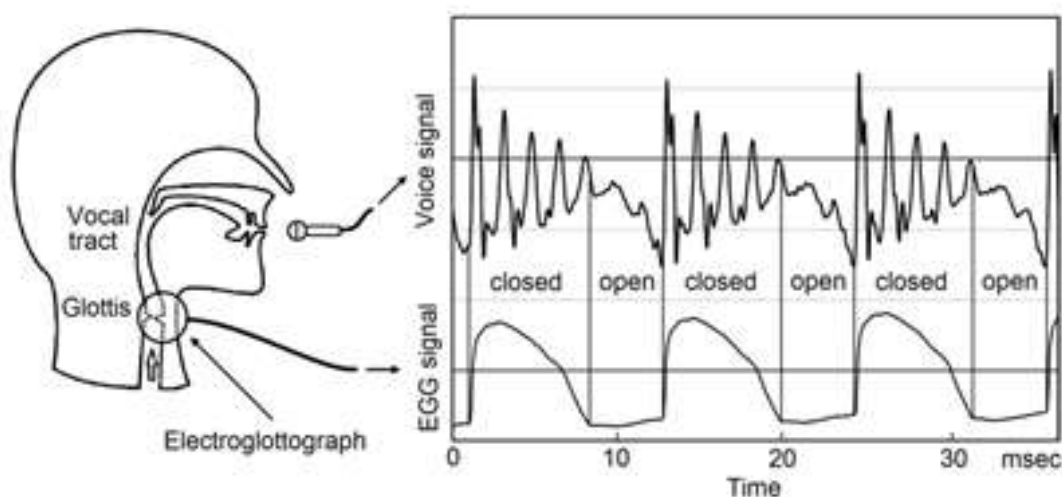


Figura 2.2: Onda sonora emitida pela voz humana. Adaptado de [21].

A velocidade do som, c , depende do meio em questão. Quando se trata de ar, nas condições normais, ou seja, a uma temperatura de 20°C e a uma pressão atmosférica a velocidade de propagação do som apresenta aproximadamente um valor de 344 m/s . Por curiosidade, quanto mais denso for o meio, maior será a velocidade da onda sonora, uma vez que há uma maior capacidade para transmitir energia derivada das vibrações das partículas às ondas sonoras. Outras causas para o aumento da velocidade do som são o

aumento da temperatura e ainda o aumento da humidade [19].

De seguida, serão explicadas as características das ondas sonoras como a frequência, o comprimento de onda e ainda a amplitude.

A frequência, f , expressa em Hz, é o número de ciclos por segundo e o comprimento de onda, λ , expressa em m, é a distância percorrida pela onda para completar um ciclo. A equação (2.1) mostra a relação entre estes conceitos. Verifica-se que quanto maior for a frequência, menor será o comprimento de onda. A velocidade do som depende apenas das propriedades físicas do meio [19, 20].

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

A frequência ainda dá a indicação da altura do som. A altura do som ou *pitch*, em inglês, é uma característica subjetiva do som e indica se um som é mais agudo (mais alto) ou mais grave (mais baixo). Quanto menor for a frequência, mais grave é o som e quanto maior a frequência mais agudo é [17]. O ser humano consegue identificar sons dentro da gama de frequências entre os 20 Hz e os 20 kHz. As frequências infra-sónicas são abaixo dos 20 Hz e as frequências ultrassónicas são acima dos 20 kHz [17], como se pode verificar na Figura 2.3.

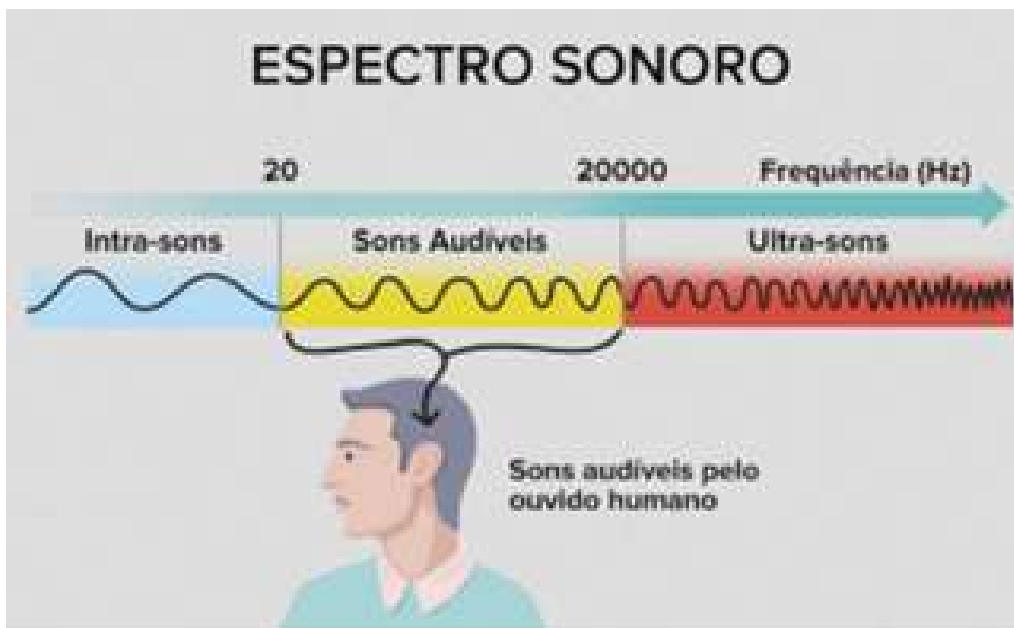


Figura 2.3: Espectro sonoro [20].

Relativamente à amplitude, esta é a magnitude instantânea de uma quantidade oscilante, como a pressão sonora [19].

Para finalizar, o ruído (em inglês, *noise*) é o som que provoca incómodo ao ser humano, uma vez que se trata de um som desagradável. Apresenta por isso alguma sensibilidade ao ser humano. O ruído é todo aquele som que perturba o discurso, música e mesmo o

silêncio [19]. Ao estar sujeita a ruído constante, o estado de saúde de uma pessoa pode ficar afetado. Este assunto será abordado de forma mais intensa no capítulo 2.2.

Segundo o Regulamento Geral do Ruído, estabelecido pelo Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de janeiro com as alterações do Decreto-Lei n.º 278/2007 de 1 de agosto, existem quatro tipos de ruído: de vizinhança, ambiente, particular e residual. O ruído de vizinhança é todo o ruído produzido pelas atividades habitacionais que provoca efeitos negativos na saúde pública ou na tranquilidade. O ruído ambiente é derivado de todas as fontes sonoras que se encontram tanto na proximidade como a uma maior distância, numa determinada circunstância e num determinado instante. O ruído particular é aquele que deriva de uma determinada fonte. Este é um componente do ruído ambiente. Por último, o ruído residual é aquele em que se eliminam um ou vários ruídos particulares.

De seguida, serão explicados conceitos fundamentais para entender de forma mais aprofundada a ciência do som, tais como a intensidade do som, a potência sonora, a pressão sonora, entre outros.

Como foi anteriormente referido, a onda propaga-se a uma velocidade, c , e as partículas do ar fazem o movimento de oscilações em torno da posição inicial com uma velocidade u . Então, para qualquer onda longitudinal a relação presente na equação (2.2) é garantida. Sendo que p é pressão sonora e ρ é a massa volúmica do ar. A quantidade $\rho \times c$ é denominada de impedância acústica e tem um valor de $415 \text{ kg/m}^2\text{s}$ a uma temperatura de 20°C [22].

$$\frac{p}{u} = \rho c \quad (2.2)$$

Sabe-se ainda que a intensidade sonora (W/m^2) é o fluxo de energia que passa por uma área unitária perpendicular à direção da propagação da onda [17]. Obtém-se a intensidade do som instantânea através da fórmula da equação (2.3) [22].

$$I = pu \quad (2.3)$$

Portanto, a intensidade sonora pode ser calculada através da equação (2.4) [22]:

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (2.4)$$

A pressão sonora será explicada de seguida e trata-se de um dos parâmetros mais importantes da acústica, uma vez que este é o mais fácil de obter. A pressão sonora é qualquer alteração da pressão atmosférica quando ocorre propagação da onda sonora no ar, ou seja, corresponde à variação de pressão [23].

Tanto a pressão sonora como a intensidade podem ser definidas como escalas logarítmicas. E quando tal acontece são denominados de níveis sonoros. Esta escala é utilizada, uma vez que comprime as gamas muito grandes da intensidade e da pressão sonora. A escala logarítmica mais usada é a escala decibel e é a que será considerada [17, 19].

O nível da intensidade sonora, L_I , (dB) é dado pela equação (2.5). Em que I corresponde à intensidade instantânea e I_{ref} (10^{-12} W/m^2) corresponde à intensidade sonora de referência [22].

$$L_I = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_{ref}} \right) \quad (2.5)$$

O nível de pressão sonora (dB) é dado pela equação (2.6), em que P_{ref} ($20 \mu\text{Pa}$) representa o valor da pressão de referência. Relativamente a este nível e a este valor da pressão de referência o valor do limiar de audição é de 0 dB e o limite a partir do qual se sente dor é de 140 dB [22], designado também por "limiar da dor". Este parâmetro serve para auxiliar na avaliação do comportamento acústico em qualquer local [19].

$$L_p(t) = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right) \quad (2.6)$$

O nível de pressão sonora equivalente é também um termo da acústica com extrema importância. Este nível é a energia média num certo ponto e num certo intervalo de tempo. Este parâmetro é definido como está representado na equação (2.7) [24]. O termo $L_p(t)$ (dB) da equação é o nível de pressão sonora. O intervalo de tempo pode ter a unidade tanto em segundos, como minutos ou até mesmo horas.

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L_p(t)}{10}} dt \right) \quad (2.7)$$

Por último, o nível de potência sonora (NPS) é dado pela equação (2.8). Este parâmetro é expresso em dB e a potência sonora de referência é 1 pW [19].

$$NPS = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{W_{ref}} \right) \quad (2.8)$$

2.1.1 Acústica em espaços interiores

A acústica em edifícios estuda a propagação das ondas sonoras em espaços fechados que contenham um único fluido, neste caso, o ar, como meio de propagação. Esta componente da acústica estuda principalmente espaços com dimensões superiores aos comprimentos de onda. No entanto, os resultados podem ser usados em espaços mais pequenos, como é o caso do espaço de restauração em estudo [22].

Mas qual é o processo da onda sonora desde que é emitida pela fonte até atingir um obstáculo num espaço fechado? A onda sonora (S) ao propagar pelo meio já está a perder uma parte da energia devido à absorção pelo ar (E), no entanto, como é uma quantidade muito pequena pode ser desprezada. Assim que esta atinge o obstáculo, parte da onda é refletida (A) e regressa ao ar enquanto o restante atravessa o obstáculo. A onda ao atravessar este obstáculo, altera a velocidade de propagação e devido a isto ocorre refração. Simultaneamente, existe uma perda de energia (F) devido à resistência que a onda sonora oferece ao penetrar o material. Quando a onda já atravessou todo o obstáculo e regressa ao

meio de propagação, ocorre novamente refração (D) e reflexão (C), tendo perdido muita energia ao longo deste processo. A representação deste processo encontra-se na figura 2.4 [19].

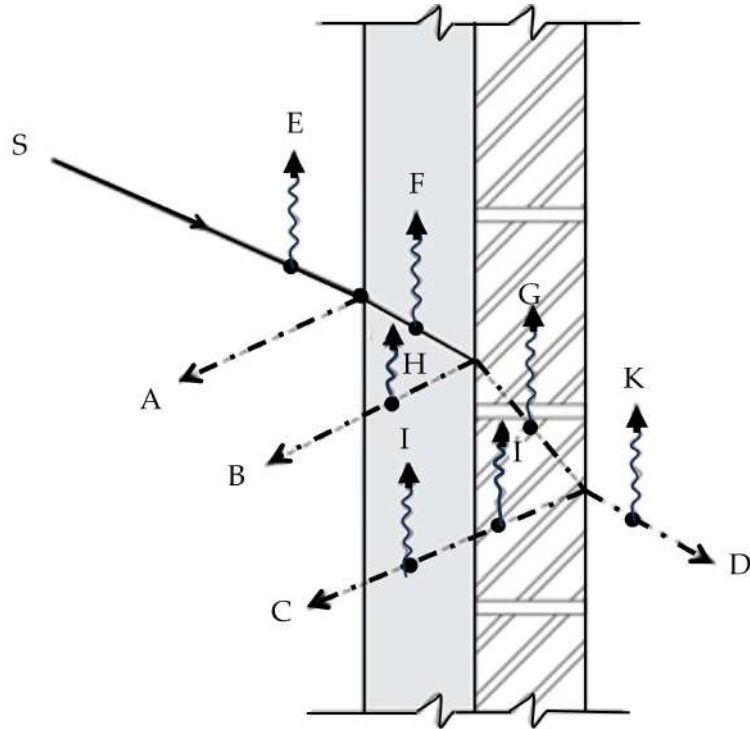


Figura 2.4: Propagação da onda sonora desde a fonte até atravessar o obstáculo [19].

Um dos parâmetros fundamentais na acústica de edifícios é o tempo de reverberação, que, segundo Wallace Clement Sabine, define quanto tempo é necessário para diminuir 60 dB no nível sonoro do espaço em estudo. Sabine chegou à conclusão de que o tempo de reverberação se relaciona com o volume do espaço e ainda com a absorção sonora, como se pode observar pela equação (2.9) [17].

$$T_{60} \propto \frac{V}{A} \quad (2.9)$$

Sendo que:

- T_{60} - Tempo de reverberação (s)
- V - Volume do espaço (m^3)
- A - Absorção sonora

Esta relação é baseada na propagação das ondas sonoras pelo meio em questão em que uma parte da onda é absorvida e outra é refletida quando atingem um obstáculo. Após um número elevado de reflexões, considera-se que o som está difuso, ou seja, a densidade média de energia é a mesma em todo o volume acústico e ainda que a probabilidade das ondas se propagarem em todas as direções é a mesma. No entanto, esta

afirmação não considera a distribuição dos materiais absorventes e a forma do espaço, não representando então o comportamento real de um espaço fechado. Apesar disto, esta relação leva a resultados válidos, se for utilizado um valor de absorção sonora baixo [17]. Se os coeficientes de absorção forem elevados deve utilizar-se a equação de Norris-Eyring [17].

Relativamente à reflexão, este fenómeno só ocorre quando o tamanho do obstáculo é consideravelmente superior ao comprimento de onda. A onda sonora reflete mais em superfícies feitas de materiais pesados do que em materiais leves [19].

Quando a onda sonora é emitida e parte é refletida, a certo instante, a intensidade sonora é superior em comparação ao valor inicial. Isto acontece devido ao facto da fonte sonora ao emitir uma onda, atingir o recetor (tempo de reverberação de 0 s), com um valor do nível sonoro equivalente ao que foi emitido pela fonte sonora. No entanto, as ondas continuam a ser refletidas e voltam a atingir o recetor, aumentando desta forma o nível sonoro, e assim sucessivamente, até que a energia da onda se dissipe [19]. A este processo denomina-se de "Hipótese de Eyring". Se se pretender que o som seja ouvido em todo o espaço, o tempo de reverberação tem de ser o mais longo possível. Se se pretender que o som não seja ouvido durante muito tempo, o tempo de reverberação tem de ser o mais curto possível [17].

A absorção sonora é um fator fundamental para definir o tempo de reverberação, uma vez que, quanto maior a quantidade de material absorvente, menor vai ser o tempo de reverberação e menor será o nível de ruído ambiente [17].

De forma a compreender a fórmula do tempo de reverberação de Sabine é fundamental ter consciência das fórmulas de que esta deriva.

A primeira equação a ter em conta é a distância média que uma onda sonora percorre entre duas reflexões sucessivas. V é o volume do espaço e S é a área superficial do espaço. A equação pode ser observada de seguida [19]:

$$d = \frac{4V}{S} \quad (2.10)$$

De seguida, pode-se observar na equação (2.11), a frequência média de reflexão, ou seja, a quantidade de reflexões que a onda sonora sofre por segundo.

$$n = \frac{cS}{4V} \quad (2.11)$$

À medida que uma onda sonora sofre reflexão, uma parte da energia é absorvida pela superfície e por isso ocorre uma redução da energia com um fator de $(1 - \bar{\alpha})$. Portanto, após um número n de reflexões e um tempo T , o fator de redução é $(1 - \bar{\alpha})^{nT}$. E como já foi referido, o tempo de reverberação é o tempo necessário para a diminuição de 60 dB [25]:

$$10 \log (1 - \bar{\alpha})^{nT} = -60 \quad (2.12)$$

Ao isolar T e a substituir n , obtém-se a equação (2.13) de Norris-Eyring [25]:

$$T_{60} = -\frac{24V}{cS \log(1 - \bar{\alpha})} \quad (2.13)$$

Por último, ao considerar $c=344$ m/s e a dividir por $\ln(10)$, obtém-se a equação (2.14) de Sabine. Esta equação aplica-se quando o meio se encontra a uma temperatura de 20 °C e a uma pressão atmosférica [17, 25].

$$T_{60} = \frac{-0,161V}{S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (2.14)$$

Para α pequenos considera-se que $-\ln(1 - \bar{\alpha}) \rightarrow \bar{\alpha}$ [26]. Daí obtém-se a conhecida equação de Sabine:

$$T_{60} = \frac{0,161V}{S\bar{\alpha}} \quad (2.15)$$

Portanto, a área absorvente é definida pela equação (2.16), em que $\bar{\alpha}$ é a absorção média de Sabine e S (m^2) é a área da superfície do espaço. Como se pode observar, A é dependente da área da superfície do espaço e das propriedades da absorção do material [17].

$$A = \bar{\alpha}S \quad (2.16)$$

O coeficiente de absorção média é calculado como está representado na equação (2.17), em que S é a soma de todas as áreas de superfície contabilizadas [17].

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i s_i a_i \quad (2.17)$$

No caso de se tratar de espaços com volumes elevados e de frequências superiores a 2 kHz, também se deve contabilizar a absorção feita pelo ar, uma vez que esta absorção também provoca a diminuição do tempo de reverberação. Este calcula-se como se encontra na equação (2.18) [17, 19].

$$T_{60} = \frac{0,161V}{S\bar{\alpha} + 4mV} \quad (2.18)$$

O parâmetro m é dependente da humidade relativa, h e ainda da frequência, f e calcula-se da forma que está representada na equação (2.19) [17].

$$m = 5,5 \times 10^{-4} \times \frac{50}{h} \times \left(\frac{f}{1000} \right)^{1,7} \quad (2.19)$$

O coeficiente de absorção de Sabine pode apresentar valores entre 0 e 1. Quando o material não detém qualquer capacidade de absorção, mas sim de reflexão, o coeficiente apresenta o valor de 0. Contudo, quando o material apenas apresenta capacidade de absorção, este apresenta o valor de 1, tendo como resultado o menor tempo de reverberação possível. Os valores do coeficiente de absorção dependem da frequência [23].

2.1.2 Soluções comuns para melhoria da acústica

A acústica é uma área que tem ganho a importância merecida, principalmente nos espaços comerciais, como os restaurantes, e portanto, é necessário perceber as possíveis soluções que existem de modo a melhorar o nível do ruído no espaço.

Caso seja possível reestruturar o edifício, deve-se ter noção de todos os tipos de superfícies que existem e compreender quais as mais vantajosas. Os exemplos dos vários tipos de superfícies existentes são: paralelas, convexas, côncavas e ainda parabólicas. As superfícies convexas são as mais desejadas, dado que o som se dispersa por todo o espaço, enquanto as restantes devem ser evitadas, visto que o som se acumula em certos pontos ou provoca eco, o que não é favorável à acústica do espaço. Também as superfícies paralelas devem ser evitadas uma vez que são a maior causa do eco num espaço fechado. O eco acontece porque o som reflete de parede em parede, com intervalos entre cada reflexão [19].

Outras soluções são superfícies lisas, mas que apresentem um ângulo de 5° ou 10°, ou ainda paredes que apresentem irregularidades. Deste modo, o som tem uma maior probabilidade de dispersar [19].

Caso não seja possível alterar a estrutura do edifício, a colocação de materiais com capacidade de absorção é uma solução [19]. Os exemplos de elementos possíveis para colocar no espaço fechado são materiais porosos ou fibrosos, painéis com capacidade de absorção e ressoadores acústicos. Para além disto, as próprias pessoas e mobília contribuem para a absorção do som [17].

Os materiais porosos ou fibrosos são aqueles cuja rede de poros ou fibras se encontra interconectada e cujos espaços vazios são compostos por ar. Este tipo de solução é eficiente, uma vez que ao ocorrer a absorção da onda sonora, sucede-se uma dissipação de energia e consequentemente há uma formação de calor nos canais. Deste modo, a energia da onda sonora no espaço reduz significativamente. O que mais caracteriza este tipo de aplicação é a porosidade e a resistência deste à passagem do ar [17, 27, 28]. Ou seja, em relação à porosidade, quanto maior for a quantidade e o tamanho destes poros, maior é a interconexão e maior será a absorção [29].

Este tipo de material é mais eficiente para altas frequências. Para situações com frequências baixas, as ondas apresentam um comprimento de onda elevado e, portanto, perdem pouca energia ao atravessar as paredes. Para contrariar esta situação deve-se aumentar a espessura do material, o que nem sempre é o mais favorável [17, 27].

Relativamente ao coeficiente de absorção deste tipo de material, este é superior para altas frequências e inferior para baixas frequências. [28]

Exemplos de materiais porosos são algodão, ladrilho acústico, reboco acústico e espumas acústicas. Alguns exemplos mais específicos de espumas são o poliuretano e o poliéster, ambos de célula aberta [9, 19]. As espumas de célula aberta são aquelas que têm poros com um diâmetro entre 0,1 mm e 0,5 mm.

Os materiais fibrosos são o outro tipo de material que é utilizado na acústica e podem

ser os seguintes: cânhamo, madeira, pelo de animal e lã de origem animal ou artificial (lã mineral, de rocha ou de vidro) [24]. Para além destes, cortinas e tapetes também podem ser exemplos. [28]

A Figura 2.5 é a representação da colocação do material poroso na parede [17, 29]. Este tipo de material também pode ser colocado, para além da parede, no teto.

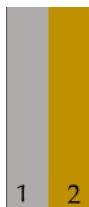


Figura 2.5: Representação da colocação de um material poroso (2) numa parede (1).

As soluções anteriormente referidas que geralmente são aplicadas nem sempre resolvem o problema do ruído, havendo então os painéis acústicos para uma performance ainda melhor. Estes podem ser lisos e perfurados.

Os painéis lisos com capacidade de absorção são os mais adequados para as baixas frequências, uma vez que é uma alternativa ao aumento de espessura dos materiais porosos. O funcionamento destes painéis assemelha-se a uma massa suspensa por uma mola, ou seja, o painel constituído por uma cavidade de ar movimenta-se segundo o ar que o rodeia. Em consequência da libertação de calor por atrito do material do painel, este flexiona e deste modo as ondas sonoras são absorvidas. [19]

No entanto, se for colocado um material poroso na cavidade, ainda maior é o coeficiente de absorção e maior é a gama de frequências baixas absorvida. A Figura 2.6 é a representação da colocação do material poroso entre o painel e a parede [17].

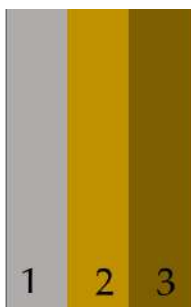


Figura 2.6: Representação da colocação de um material poroso (2) entre a parede (1) e o painel (3).

Relativamente aos painéis de absorção perfurados, estes podem ser feitos de madeira, alumínio ou até mesmo de plástico (acrílico) e são muitas vezes utilizados como um teto falso. O conceito deste tipo de painel baseia-se em vários furos num painel que se assemelha a vários ressoadores acústicos que serão explicados de seguida [28]. Este tipo de aplicação é mais eficiente quando as ondas sonoras atingem o painel de forma perpendicular e não com um ângulo, o que não pode ser garantido. [19]

O que define a eficácia deste tipo de painel é a área de perfuração, ou seja, quanto maior for, maior será a absorção das ondas sonoras na gama de frequências médias e baixas [28]. De forma a absorver ondas sonoras na gama de baixas frequências aumenta-se a espessura da caixa de ar e ainda pode ser colocado um material poroso[19, 28].

Outra solução é o ressoador acústico e baseia-se em cavidades preenchidas com ar numa parede de betão que têm ligação ao espaço fechado, através de uma abertura. O funcionamento deste consiste na absorção da energia da onda sonora através do movimento do ar na cavidade. O único problema é o facto de o ressoador apenas funcionar para uma certa gama de frequências que depende da geometria deste. A Figura 2.7 é a representação do ressoador acústico [17, 23].



Figura 2.7: Representação do ressoador acústico.

Por último, a mobília presente no espaço também contribui para o aumento da absorção da energia acústica, como por exemplo mobília de madeira e bancos estufados. As próprias pessoas também contribuem para a absorção [17].

Outro fator importante a perceber relativamente à aplicação de soluções é os locais mais indicados a serem colocados.

Primeiramente, deve-se perceber que é mais vantajoso colocar as várias soluções não de forma contínua, mas sim de forma espaçada, uma vez que, deste modo, aumenta-se a absorção das ondas sonoras. Para além disto, deve-se ter em conta os locais onde devem ser colocadas: paredes e teto [19]. Junto às arestas e cantos dos espaços, a quantidade de energia sonora é muito superior, principalmente da gama de frequências predominantes do espaço, existindo deste modo uma absorção elevada se os materiais absorventes forem colocados nesses pontos [19]. Podem ser aplicados ou na parte superior ou na parte inferior da parede, sendo a última opção o suficiente para uma absorção eficiente [7]. Uma regra muito importante na aplicação de soluções é que não pode haver paralelamente duas paredes não tratadas [19].

2.1.3 Simulação numérica em Elementos Finitos (*Ansys*) do campo acústico

Como foi referido anteriormente, a acústica é o estudo não só da geração e propagação das ondas acústicas mas também da absorção e reflexão destas nas superfícies [30]. As áreas de aplicação dos módulos de acústica no *Ansys Workbench* são sonar, *design* acústico de aparelhos e de edifícios, acústica subaquática e, ainda, investigação de ruído [31].

A versão 18.2 do Ansys é a que está a ser utilizada para realizar as simulações e nesta os módulos existentes de acústica são *Harmonic Acoustics* e *Modal Acoustics*. *Harmonic acoustics* é o meio de análise que estuda o comportamento de uma estrutura e do fluido em caso quando é imposta uma ou mais excitações que variam harmonicamente com o tempo. Já com o *Modal Acoustics* obtém-se o comportamento do espaço sem nenhuma excitação aplicada, isto é, através deste percebe-se as frequências naturais e, ainda, a densidade de energia sonora no espaço [32]. No entanto, também há a opção de apenas modelar o fluido [30]. Estes módulos assumem que o fluido é compressível, mas é definido que as alterações de pressão deste são muito pequenas [30].

Nos módulos de acústica existem três tipos de condições de fronteira [30]:

1. Condição de Dirichlet

Nesta condição o que define a fronteira é a pressão e existem dois tipos de situações: quando é aplicada uma pressão com valor P ou então uma pressão com um valor 0. No último caso a fronteira é considerada como sendo *Sound Soft Boundary*.

2. Condição de Neumann

Na condição de Neumann, o que caracteriza as superfícies é a aplicação de um valor de velocidade. **O que está definido nos módulos da acústica é que todas as superfícies têm aplicado uma velocidade 0. Deste modo, as fronteiras estão definidas como *Sound Hard Boundary*, ou então, superfícies rígidas.** Quando o valor da velocidade é diferente de 0 considera-se que está a ser aplicado uma excitação.

3. Condição de Robin

Na condição de Robin, o que caracteriza as fronteiras é o valor dado da admitância a cada superfície. A admitância é o oposto da impedância. A impedância depende da construção e do comportamento físico da superfície e é o que define o movimento das partículas do meio junto da superfície [26]. No caso da impedância ocorre uma dificuldade de passagem do meio pela superfície, enquanto que, admitância permite a passagem da onda pela superfície [33].

De modo às simulações numéricas serem realizadas é fundamental fornecer as propriedades mais importantes do fluido acústico em estudo ao *software*: a massa volúmica e a velocidade do som no meio em questão. Caso se pretenda contabilizar a viscosidade do ar, também se dever inserir a viscosidade dinâmica. Deste modo, considera-se a dissipação da energia das ondas sonoras através da passagem destas no meio [30].

O Ansys indica ainda diretrizes fundamentais de modo a obter uma malha com a maior qualidade e refinamento possível. Existem dois tipos de situações: elementos quadráticos e elementos lineares. Caso se opte por elementos quadráticos, o tamanho do elemento deve ser aquele em que respeite o facto de ter de haver 6 elementos por comprimento de onda. Relativamente aos elementos lineares, o comprimento de onda deve conter pelo menos

12 elementos. A discretização da malha depende do tipo de elementos escolhido, mas é maior para os elementos lineares [30]. Para além disso, também depende da frequência, pois o comprimento de onda é dado pela equação (2.1).

O procedimento das simulações acústicas é constituído pelos seguintes passos [31]

1. Construir um modelo do espaço/objeto em estudo num *software* de modelação 1D/2D/3D;
2. Obter um único corpo que, posteriormente, será definido como a região acústica (região composta pelo fluido em estudo);
3. Obter uma malha refinada e com maior qualidade possível, segundo as regras definidas pelo *Ansys* que depende da escolha de elementos quadráticos ou lineares;
4. Definir a gama de frequências em que se pretende realizar o estudo do campo sonoro, no *Analysis Settings* e ainda definir a região acústica mencionada no ponto 2;
5. Definir as condições de fronteira: a impedância, coeficiente de absorção e radiação infinita de uma superfície e, ainda, pressão e a velocidade nas superfícies;
6. Definir as excitações sonoras e ainda que tipo de soluções se pretende obter. Pode-se obter como solução, os níveis da pressão sonora segundo a malha A, a pressão sonora, entre outros.

2.1.4 Equipamentos de medição

Para avaliar e fazer medições do ruído quer no exterior quer no interior, são necessários equipamentos de medição de qualidade. Através destes, é possível obter parâmetros necessários para compreender se o espaço se encontra com estes abaixo dos limites definidos por lei. Um dos parâmetros mais utilizados é o nível de pressão sonora, L_p .

Portanto, para se realizar estas medições utilizam-se sonómetros, dosímetros, microfones e ainda calibradores.

O sonómetro é o instrumento que mede o nível sonoro ouvido pela pessoa e que apresenta as medições mais precisas [23]. Este equipamento tem a capacidade de fazer medições durante os intervalos de tempo desejados pelo operador. Na Figura 2.8 encontra-se representado um sonómetro.



Figura 2.8: Instrumento de medição do nível sonoro, sonómetro [34].

A calibração de um sonómetro pressupõe a emissão de uma pressão sonora constante, o que é conseguido com um calibrador acústico [23].

O dosímetro é um tipo de sonómetro que tem como objetivo medir o nível sonoro a que um trabalhador está sujeito, ao longo do horário de trabalho. No entanto, só se deve recorrer ao dosímetro nas situações em que não é possível usar um sonómetro, por exemplo em locais de difícil acesso [23]. Na Figura 2.9 encontra-se representado um dosímetro.



Figura 2.9: Instrumento de medição na área da acústica, dosímetro [35].

2.2 O sistema auditivo e os efeitos prejudiciais no ser humano

A fisiologia é a área que estuda a estrutura do ouvido e a psicoacústica é a área que estuda a perceção da audição no ser humano. Na psicoacústica estuda-se o trajeto do som, desde o ouvido até ao cérebro e ainda a sensibilidade auditiva [19].

De modo a ocorrer a percepção auditiva, uma fonte sonora tem de produzir um som, que se transmite até ao recetor. Esta onda ao atingir o ouvido provoca movimentos mecânicos e consequentemente são transmitidos impulsos elétricos para o cérebro [19].

O ouvido é constituído por três componentes: ouvido externo, ouvido médio e ouvido interno, como se pode observar pela representação presente na Figura 2.10.

O ouvido externo é a parte visível e a composição deste é principalmente pele e cartilagens, que compõem o canal auditivo e o tímpano. No tímpano, o nível de pressão sonora é superior em 10 *dB* em comparação à entrada, quando se trata de frequências baixas, mas quando se trata de frequências altas, entre os 2 e os 6 kHz ainda se considera a difração das ondas sonoras na cabeça e o nível de pressão sonora no tímpano pode ter um valor entre 15 a 20 *dB* mais elevado [17]. O ouvido externo tem como função conduzir as ondas para o ouvido médio e, ainda identificar a que distância e em que direção a pessoa se encontra da fonte sonora [23] e proteger o tímpano de danos [22].

As funções do ouvido médio iniciam imediatamente após o tímpano e é composto por três ossículos: o martelo, a bigorna e o estribo [23]. O processo no ouvido médio consiste principalmente na transmissão das vibrações do martelo para a bigorna, e desta para o estribo. Por sua vez, o estribo provoca a vibração dos fluidos do ouvido interno. O ouvido médio tem como objetivo amplificar o som entre 20 e 30 *dB* e ainda proteger o sistema auditivo de sons muito intensos, através da compressão dos ossículos que consequentemente limitam a passagem da energia vibratória [23].

Por último, o ouvido interno ou cóclea é o responsável por receber e analisar o som e como tem uma elevada sensibilidade é o primeiro a danificar devido ao ruído. Como foi referido anteriormente, após a passagem das ondas sonoras no ouvido médio ocorre a vibração dos fluidos no ouvido interno, o que vai provocar uma onda que atravessa grupos diferentes de células que por sua vez vão estimular vários grupos de neurónios em função da frequência. É através deste processo que se distingue vários sons com frequências diferentes [23].

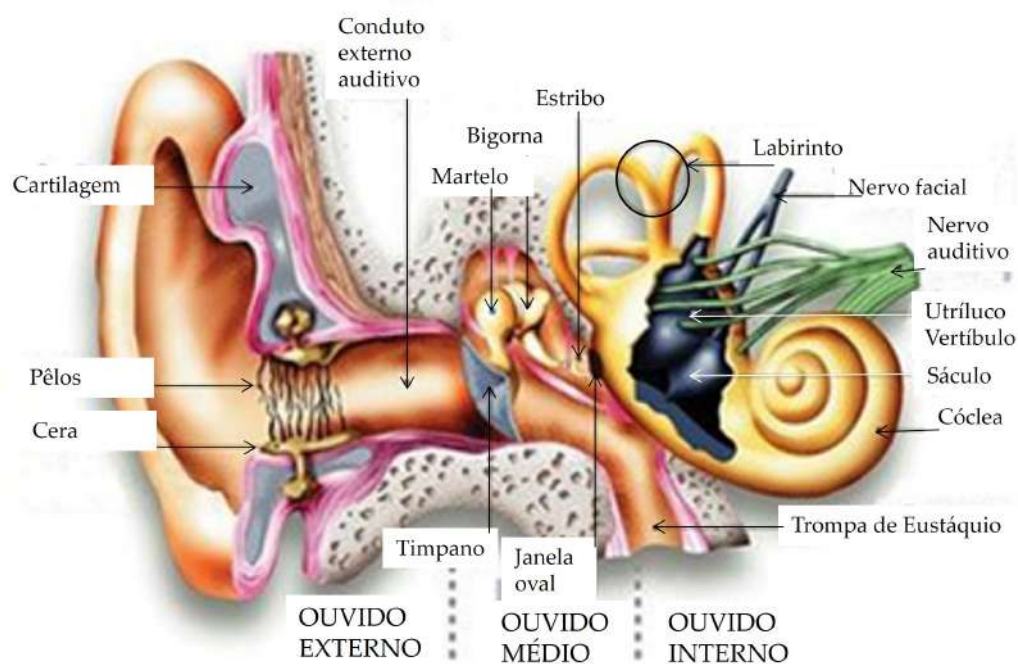


Figura 2.10: Estrutura do ouvido humano [36].

Através da análise da composição do ouvido humano, conclui-se que este apresenta uma elevada fragilidade à exposição ao ruído, uma vez que, ao se verificar uma excitação elevada das células, aumenta a probabilidade de lesões na estrutura [23].

As alterações podem ser reversíveis e permanentes. São permanentes quando uma pessoa está exposta durante um elevado intervalo de tempo a níveis de pressão sonora superiores a 80 dB(A) ou então a exposições súbitas que ultrapassem 120 dB [23].

Os primeiros sinais de um sistema auditivo danificado são o zumbido e ainda o desvio temporário dos limiares de audição. Este desvio dá-se quando ocorre demasiada excitação nas células, o que provoca a sua subida e pode ser descrita como perda auditiva temporária. Quando a pessoa está exposta durante muito tempo a níveis de pressão sonora elevados, pode ocorrer o desvio permanente dos limiares de audição. Para além destes, ainda pode ocorrer o incremento da sensibilidade ao ruído e a diminuição da seletividade das frequências [23].

Relativamente ao bem-estar do ser humano, uma pessoa pode sofrer consequências da exposição ao ruído tais como [23]:

- mal-estar;
- stress;
- dificuldade em dormir;
- aceleração do ritmo cardíaco;
- hipertensão arterial;

- estreitamento dos vasos sanguíneos;
- produção de adrenalina,
- entre outros.

De modo a perceber se o valor do nível de pressão sonora se encontra abaixo do nível permitido por lei, é fundamental realizar avaliações à acústica dos espaços em que as pessoas trabalham, vivem e até mesmo convivem. E se tal não acontecer, é imperativo proceder à melhoria da acústica do espaço em questão.

2.3 Legislação

Para a boa realização deste trabalho, é fundamental perceber quais as legislações e normas que se aplicam na área da acústica.

As legislações indicadas em seguida são aquelas que definem a nível acústico os limites de vários parâmetros que não podem ser ultrapassados: o Regulamento Geral do Ruído (RGR) e o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE). O RGR foi aprovado pelo Decreto-Lei n.º 9/2007, de 17 de janeiro, retificado pela Declaração de Retificação n.º 18/2007, de 16 de março, e alterado pelo Decreto-Lei n.º 278/2007, de 1 de agosto. O RRAE foi aprovado pelo Decreto-Lei n.º 129/2002, de 11 de Maio, mas foi atualizado pelo Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho.

O RGR adequa-se à Norma Portuguesa NP ISO 1996 (2019) que é composto por duas partes: "Acústica. Descrição, medição e avaliação do ruído ambiente. Parte 1: Grandezas fundamentais e métodos de avaliação." e "Parte 2: Determinação dos níveis de pressão sonora.". A legislação garante que a saúde do ser humano não fica em causa, através da prevenção e do controlo do nível de ruído, como está descrito no Artigo 1.º do Capítulo I do RGR [37]. O RGR estabelece os valores limites dos indicadores de avaliação do ruído ambiente e como serão feitos os processos de medições dos parâmetros em estudo [38].

Segundo o Regulamento Geral do Ruído, para uma atividade ruidosa permanente, ou seja, atividades que produzam ruído permanentemente, como espaços comerciais e de serviços, o critério de incomodidade (o critério que mais se adequa a avaliações do ambiente acústico no interior) define que os valores entre a diferença do valor do indicador L_{Aeq} do ruído ambiente obtido durante a ocorrência do ruído particular e do valor do indicador L_{Aeq} do ruído residual devem estar de acordo com a tabela 2.1 [37].

Tabela 2.1: Valores limite de acordo com o critério de incomodidade [37].

Período de referência	Valor limite (dB)
Diurno	5
Entardecer	4
Noturno	3

O RRAE foi a legislação a ter em conta na realização da dissertação. Esta legislação define os requisitos acústicos obrigatórios para os edifícios, de forma a melhorar o ambiente acústico do espaço em questão e também para contribuir de forma positiva para a saúde humana. A legislação aplica-se aos edifícios habitacionais e mistos; edifícios comerciais, industriais ou de serviços; edifícios escolares e de investigação; edifícios hospitalares; recintos desportivos e ainda estações de transporte de passageiros [39].

Como o espaço em estudo é um espaço de restauração, considera-se o artigo 6º que menciona edifícios comerciais, industriais ou de serviço. Este artigo indica o critério para o tempo de reverberação; para o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea normalizado e ainda a sons de percussão [39].

Para esta dissertação, apenas se considerou o critério do tempo de reverberação, pois não havia acesso a uma máquina de percussão nem a outros compartimentos do edifício.

Relativamente a este parâmetro acústico, está estabelecido no RRAE, que a diferença entre o valor obtido e o valor que corresponde a 25% do valor regulamentar (fator I) tem de ser inferior ao limite regulamentar, de acordo com a alínea ii, do ponto 4 do artigo 6.º. O limite regulamentar é definido pela equação (2.20) e pode ser consultado no quadro I do RRAE.

$$T_{60} = 0,15V^{1/3} \quad (2.20)$$

Este artigo ainda define que as medições do tempo de reverberação devem ser feitas quando o espaço se encontra desocupado e mobilado normalmente. O valor final do tempo de reverberação a ser comparado com o valor limite regulamentar é a média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz [39].

Por último, para realizar os inquéritos aos trabalhadores do espaço de restauração, recorreu-se à Norma Portuguesa 4476: "Acústica. Avaliação da incomodidade devida ao ruído por meio de inquéritos sociais e sócio-acústicos."

O ESPAÇO A ESTUDAR E METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS

3.1 Caracterização do espaço

Como foi referido o espaço em estudo é um espaço de restauração, a Casa do Pessoal que se localiza na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Para a realização deste trabalho, foi fundamental perceber as dimensões, a geometria do espaço e a composição das superfícies. No apêndice A.1 encontra-se uma planta do espaço de restauração em estudo que foi fornecida pelo espaço.

De seguida, serão mencionados alguns pontos principais de modo a compreender a construção do espaço de restauração.

- O espaço de restauração não tem divisão entre as duas zonas principais: a área da cozinha e da refeição;
- O formato do espaço é irregular;
- Existem áreas envidraçadas apenas em duas paredes. As restantes são lisas;
- Existe um teto falso cuja composição será explicada posteriormente;
- Há objetos espalhados por todo o espaço, principalmente com propriedades refletoras.

A área e o pé direito máximo do espaço foram fornecidos e encontram-se na planta e na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Dados do espaço de restauração retirados da sua planta.

Área (m²)	98
Pé direito máximo (m)	2,80

Como foi referido, é importante compreender as composições das superfícies que estão em contacto com o espaço, ou seja, é necessário saber que tipo de material compõe as

paredes, o teto e o chão. O teto do espaço de restauração é composto por três camadas: o teto falso de pladur pintado que está diretamente em contacto com o interior com uma espessura de 15 mm, uma cavidade de ar com espessura de 40 cm e, por fim, o betão. As paredes são compostas por betão e por camadas de tinta e o chão é composto por ladrilho cerâmico. Pode observar-se, nas Figuras 3.1 e 3.2, as superfícies referidas.



Figura 3.1: Materiais sobrepostos nas superfícies.

Para além do que foi mencionado anteriormente, identificam-se as áreas envidraçadas do espaço de restauração na figura 3.2. As paredes a) e b) têm uma área envidraçada de 21 % e 52,8 %, respetivamente. Esta diferença entre as áreas pode ser observada pelas imagens apresentadas de seguida. Portanto 15,5 % das paredes representa as áreas envidraçadas.



Figura 3.2: Paredes envidraçadas do espaço.

Como foi mencionado anteriormente, os objetos no interior do espaço são fundamentais para definir o ambiente acústico e, por conseguinte, é necessário conhecer o material e quantidade presente no espaço que é composto por 17 mesas e 44 cadeiras de melamina, 12 cadeiras de plástico, 2 balcões de vidro, 12 bancadas de aço inoxidável, 3 suportes de tabuleiros de aço inoxidável, 3 quadros de tela de pano, 1 quadro de borracha, 2 acrílicos, 1 máquina frigorífica e, ainda, 1 exaustor e 2 máquinas de aço inoxidável. Em a) da figura 3.3 observam-se balcões, máquinas e objetos de aço inoxidável e, ainda, uma máquina frigorífica. Em b) da figura 3.3 observam-se mais balcões e equipamentos de aço inoxidável e, ainda, mesas e cadeiras de melamina.



Figura 3.3: Equipamentos existentes no espaço em estudo.

3.2 Inquérito para caracterização subjetiva da percepção ao ruído

Como foi referido no capítulo 2.2, o ruído tem um efeito negativo no ser humano, e de modo a compreender como é que o ruído na Casa do Pessoal afeta os funcionários, considerou-se fundamental realizar um inquérito confidencial escrito aos mesmos. O público-alvo escolhido foram os funcionários, uma vez que estes estão presentes no espaço de restauração durante 8h por dia e podem dar respostas mais exatas.

O objetivo do inquérito não foi só compreender a forma como o ruído afeta os funcionários, mas também, verificar a percepção de cada um ao ruído. A percepção depende da idade, da sensibilidade auditiva, do estado de saúde e ainda das condições socio-económicas e alguns destes fatores foram questionados no inquérito, de forma a obter o que se pretende [40].

O inquérito foi realizado de acordo com a Norma Portuguesa 4476: "Acústica. Avaliação da incomodidade devida ao ruído por meio de inquéritos sociais e sócio-acústicos." No apêndice A.3, pode consultar-se o inquérito completo. A norma indica que o inquérito deve conter no mínimo a data e o local do inquérito e, ainda, questionar o impacto do ruído nos trabalhadores. A norma ainda indica as várias escalas que podem ser utilizadas e, neste caso, considerou-se a escala explicada de seguida.

As questões têm uma ordem sequencial e apenas uma tem resposta aberta. De seguida, será explicado o porquê de cada questão estar no questionário. As restantes ou têm resposta de escolha múltipla ou têm uma escala com valores de 1 a 5, em que:

- 1 corresponde a "Absolutamente nada (...);"
- 2 corresponde a "Ligeiramente (...)"
- 3 corresponde a "Moderadamente (...)"
- 4 corresponde a "Muito (...)"
- 5 corresponde a "Extremamente (...)"

Na tabela 3.2 encontra-se a razão de cada questão ter um peso importante para a realização do inquérito. Todas as questões trataram de caracterizar a percepção auditiva dos funcionários. No capítulo 5.1, serão apresentados os resultados do inquérito.

Tabela 3.2: Descrição dos objetivos das questões do questionário.

Questão	Objetivo
1	Caracterizar o grupo etário dos colaboradores, uma vez que a idade influencia a sensibilidade ao ruído de cada indivíduo.
2	Perceber a urgência de melhorar as condições acústicas do espaço de restauração, pois, se a quantidade de respostas em que a sensibilidade ao ruído for muito elevada, o melhoramento acústico deve ser algo a ser feito com brevidade.
3	Perceber se as respostas dadas pelos funcionários eram unânimes relativamente à seleção das horas que provocam maior desconforto devido ao ruído. Deste modo, percebe-se também a percepção ao ruído de cada colaborador
4	Perceber quais são as fontes de ruído que mais perturbam os funcionários da Casa do Pessoal.
5	Compreender o impacto que as fontes sonoras mencionadas anteriormente, têm em cada indivíduo.
6	Entender o nível da sensibilidade de cada funcionário quando há uma mudança súbita de silêncio para ruído intenso.
7	Verificar que quanto maior for o nível de ruído a que uma pessoa está sujeita, que de facto pode haver efeitos negativos.

3.3 Instrumentação

Para a realização do trabalho experimental, foi utilizado um sonómetro, que apresenta as seguintes características: Classe II, Chauvin Arnaud, modelo SE322, com data Logger (precisão ± 2 dB). Através deste, foram medidos os níveis da pressão sonora diários e obteve-se ainda o tempo de reverberação. O sonómetro utilizado pode ser observado na figura 3.4 a). É de referir que o instrumento deveria ter sido certificado pelo IPQ, Instituto Português da Qualidade, e, que, detivesse um certificado de verificação válido para o ano de 2023 e que fosse da classe de exatidão 1 [38]. Na figura 3.4 observa-se em a) o sonómetro utilizado e em b) o ecrã deste e as definições necessárias para a realização das medições.



Figura 3.4: Configuração do sonómetro utilizado.

De seguida, serão explicadas as definições (ponderação temporal e malha) que podem ser escolhidas no equipamento de medição e equipamento de análises.

Como foi referido anteriormente, o ser humano tem uma percepção auditiva dentro da gama de frequências entre 20 *Hz* e 20 *kHz*. No entanto, há um intervalo de frequências ([500;4000] *Hz*) em que há uma maior sensibilidade auditiva e uma vez que os instrumentos de medição apresentam uma sensibilidade a uma elevada gama de frequências, utilizam-se filtros para que o valor medido possa representar o melhor possível a sensibilidade humana. Ou seja, o aparelho indica o valor do nível sonoro mais próximo ao que uma pessoa perceciona [22].

Este filtro é definido pela escolha da curva de ponderação [38]. Existem quatro curvas possíveis, mas apenas três delas encontram-se representadas na figura 3.5. A curva A é a mais indicada e a mais usada, pois é a que melhor representa a variação da sensibilidade do ouvido humano. A curva A é a que melhor antecipa a perda de audição devido à elevada exposição de ruído. As curvas B e C têm o propósito de representar a variação da sensibilidade sonora com níveis de pressão sonora muito elevados, não sendo, portanto, tão utilizadas. A curva C é usada principalmente a um nível industrial para definir os protetores auriculares [22]. Por último, a curva D tem o objetivo de filtrar os níveis de ruído derivados dos aviões e não é tão utilizada como as restantes [22]. Neste caso, decidiu-se que a curva A era a melhor solução, ou seja, as unidades do nível de pressão sonora são *dB(A)*, para o trabalho em questão.

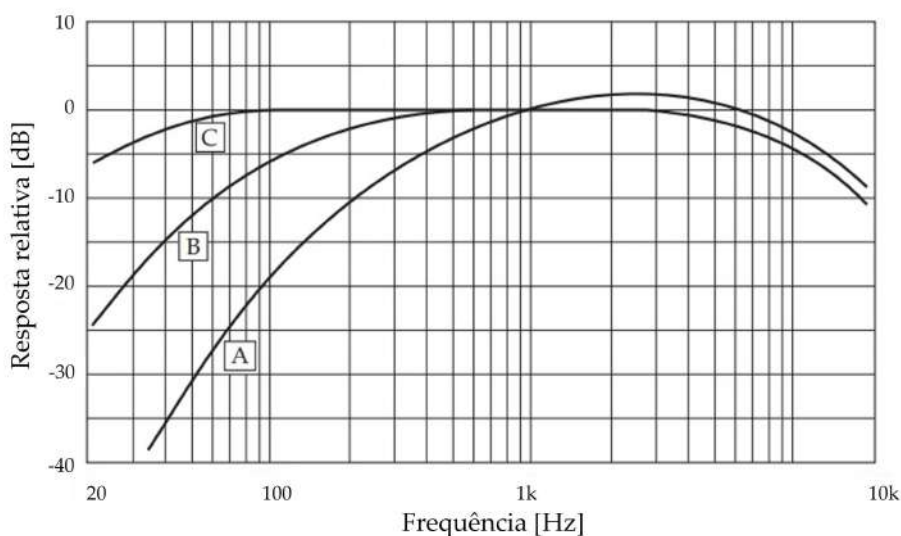


Figura 3.5: Resposta relativa das curvas de ponderação A, B e C. Adaptado de [19].

A ponderação temporal é um parâmetro fundamental para fazer as medições. Existem duas opções: uma ponderação temporal "*fast*" (F) e uma ponderação temporal "*slow*" (S). Estas têm como objetivo atenuar as alterações que podem ocorrer no sinal obtido [41]. A ponderação F é mais adequada para as atenuações do que a ponderação S [22]. Observam-se exemplos das atenuações na Figura 3.6. As constantes temporais da ponderação F e

da ponderação S têm um valor de 125 ms e de 1 s, respetivamente. Considerou-se uma ponderação temporal "fast".

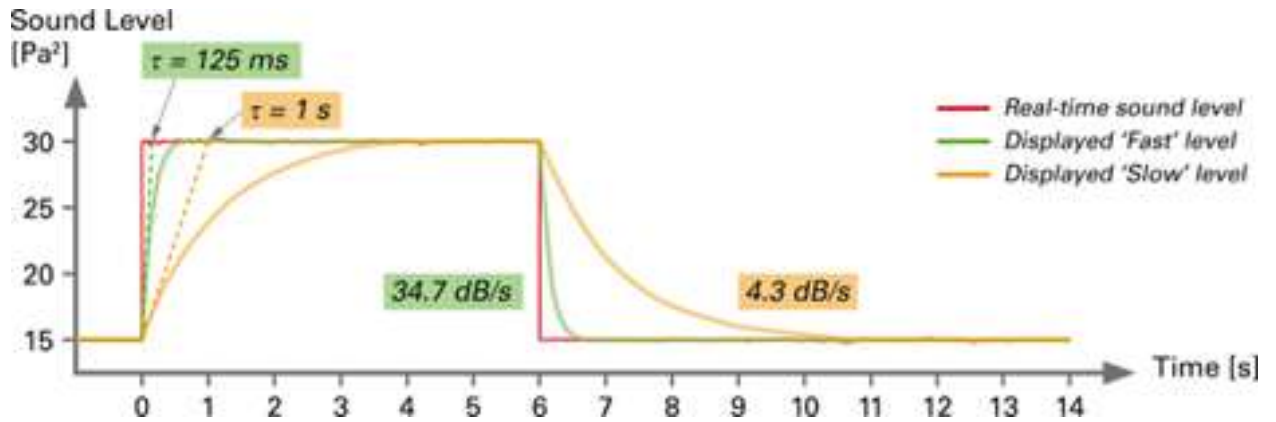


Figura 3.6: Atenuação das alterações do sinal obtido para as ponderações F e S. Adaptado de [41].

Por último, a banda de frequências é um conceito fundamental para entender o processo das medições. Para além do filtro da curva de ponderação no instrumento de medição, também é necessário um filtro da banda de frequências, no entanto, o sonómetro à disposição para este trabalho não tem a opção de escolher este filtro. Este filtro seleciona a gama de frequências em que se pretendem analisar as medições. Existem três tipos de filtros de bandas: a oitava, um terço de oitava e ainda um décimo de oitava. Estas bandas são compostas por vários intervalos de frequências. Estes intervalos caracterizam-se pelas frequências limite superior, f_u , limite inferior, f_l e central, f_c . Os termos anteriores relacionam-se pela equação (3.1). Por sua vez, a relação entre os termos f_u e f_l das bandas oitava, um terço de oitava e um décimo de oitava é descrita pelas equações 3.2, 3.3 e 3.4, respetivamente [17].

$$f_c = \sqrt{f_u f_l} \quad (3.1)$$

$$\frac{f_u}{f_l} = 2 \quad (3.2)$$

$$\frac{f_u}{f_l} = 2^{1/3} \quad (3.3)$$

$$\frac{f_u}{f_l} = 2^{1/10} \quad (3.4)$$

Encontram-se, no apêndice A.2, os valores das frequências centrais e o intervalo em que estas se inserem da banda oitava e da banda um terço de oitava.

Antes de cada utilização, o sonómetro foi calibrado com um *Center 326 sound level calibrator*. Este instrumento respeita a norma IEC 60942 (2003) classe 2m ANSI S1.40-1984 e calibra valores de 94 dB e 114 dB a uma frequência de 1000 Hz. Para a calibração, o sonómetro teve que estar com vários filtros ativos:

- A curva A tinha de ser a escolhida, estabelecendo então a unidade dB(A);
- A opção da ponderação temporal devia estar definida como FAST;
- O limite mínimo e máximo de medição deviam ser 50 dB e 100 dB.

Na Figura 3.7 observa-se o sonómetro a ser calibrado.



Figura 3.7: Sonómetro a ser calibrado de modo a ler um valor de 94 dB(A).

Para além do sonómetro e do calibrador, foram necessários outros instrumentos para realizar as medições experimentais. Primeiramente, foi utilizado um tripé de forma a garantir a estabilidade do sonómetro durante a realização das medições do nível de pressão sonora.

Relativamente à medição do tempo de reverberação, para além dos instrumentos anteriormente utilizados, foram necessários o *software* REW, o *software* SE322, balões e ainda a coluna já existente no espaço de restauração, da marca *Party Light and Sound*.

O *software* REW garante a transmissão de vários tipos de ruído e ainda a medição do nível de pressão sonora e do tempo de reverberação. A função deste *software* depende das

configurações escolhidas pelo utilizador. Para este caso, configurou-se de modo a gerar ruído cor de rosa aleatório nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz. Um exemplo de uma configuração encontra-se representado na figura 3.8.

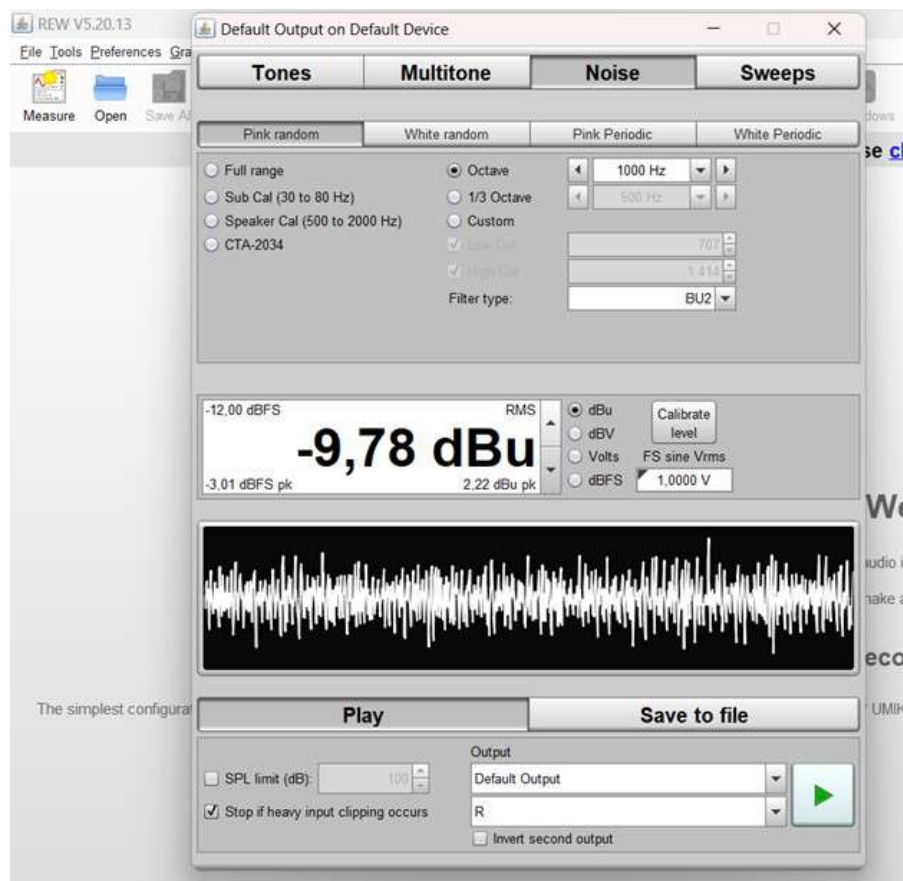


Figura 3.8: Configurações definidas para transmitir ruído cor de rosa aleatório na banda de oitava centrada na frequência de 1000 Hz.

A coluna *Party Light and Sound* originou as ondas sonoras que o *software* anteriormente referido transmitiu. Esta coluna tem uma potência de 300 W e um *woofer* com um diâmetro de 20 cm. A conexão destes foi feita via *Bluetooth* [42]. A figura 3.9 representa a coluna utilizada durante as medições experimentais.



Figura 3.9: Coluna utilizada nas medições experimentais [42].

Outro *software* utilizado foi o SE322 que vinha incluído com o sonómetro. Através deste fizeram-se as medições em tempo real do nível de pressão sonora em duas posições diferentes (figura 3.11). Deste modo, garantiu-se uma leitura mais rigorosa devido à taxa de mostragem de 0,1 s. Obtiveram-se gráficos do nível de pressão sonora ao longo do tempo e através destes alcançaram-se os tempos de reverberações nas duas posições. Na figura 3.10 está representado a página inicial do *software*, incluindo o gráfico obtido do L_p em função do tempo após uma medição.

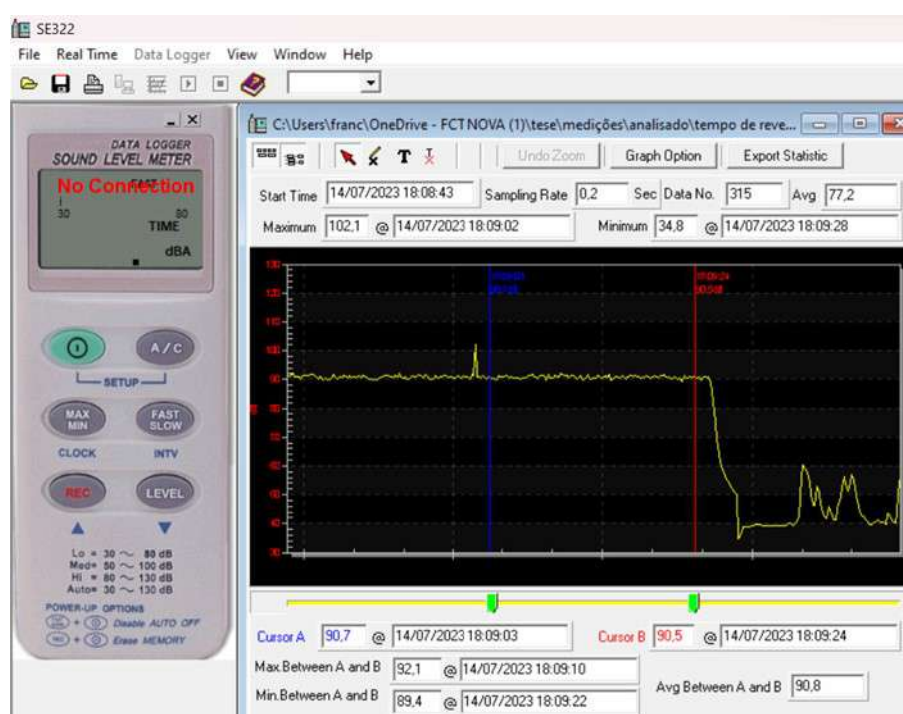


Figura 3.10: Ecrã inicial do programa SE322, mostrando o espaço para representação dos dados obtidos (*printscreen*).

Na Figura 3.11, observam-se as posições definidas para a fonte sonora (FS), a coluna e o balão, e para o sonómetro (P1 e P2). Como a coluna não era omnidirecional assumiu-se que estava virada para a P1.

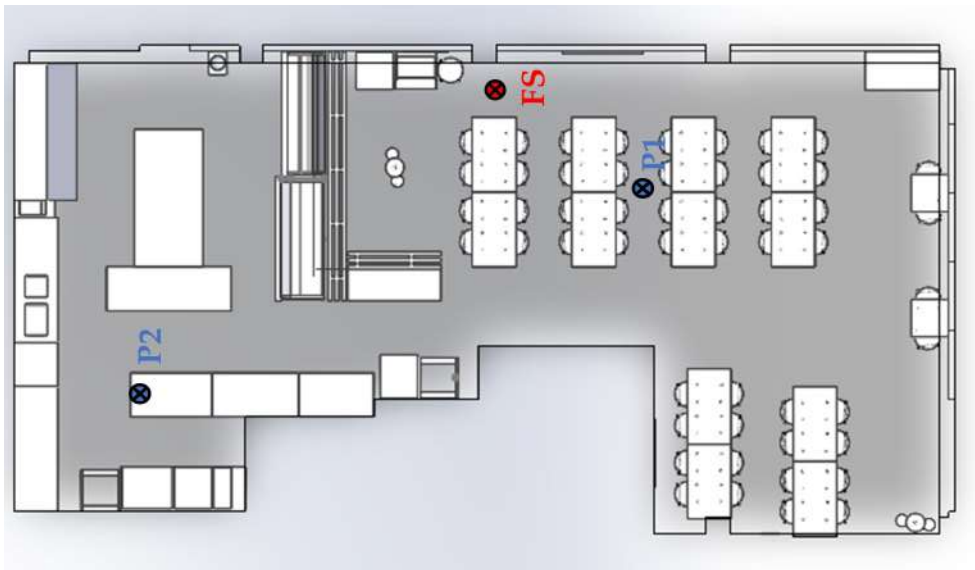


Figura 3.11: Posições para a fonte sonora (FS) e para o sonómetro (P1 e P2).

Por último, foram utilizados balões para obter o tempo de reverberação através de outro método que vai ser posteriormente explicado.

Ainda se recorreu a um telemóvel e ao *software Spyder*, de modo a obter o gráfico da resposta em frequência do espaço na hora de maior ruído, que pode ser observado na secção 5.4.

Relativamente aos instrumentos utilizados para a obtenção de resultados numéricos, recorreu-se ao *SolidWorks* para modelar o espaço de restauração em 3D e ainda o *Ansys* versão 18.2, mais especificamente, o módulo *Harmonic Acoustics*.

3.4 Regulamento aplicável

O parâmetro acústico estudado nesta dissertação foi o tempo de reverberação T_{60} e portanto apenas este foi comparado com o valor limite regulamentar, definido pela equação (2.20). Para obter T_{60} também é importante conhecer 25 % do valor regulamentar (secção 2.3), indicado na tabela 3.3.

O valor do volume a ser considerado foi 274,4 m³, em que a área e a altura (pé direito máximo) foram estabelecidos como os valores fornecidos pela planta, que podem ser observados na tabela 3.1. O valor do volume foi simplificado, pois considerou-se que o teto tem apenas um único pé direito (2,80 m) e para além disso, a área também não considerou todos os pormenores, como o espaço envolvente das áreas envidraçadas.

Tabela 3.3: Valores fundamentais definidos pela legislação para o tempo de reverberação.

Valor regulamentar	0,975 s
25 % do valor regulamentar	0,244 s

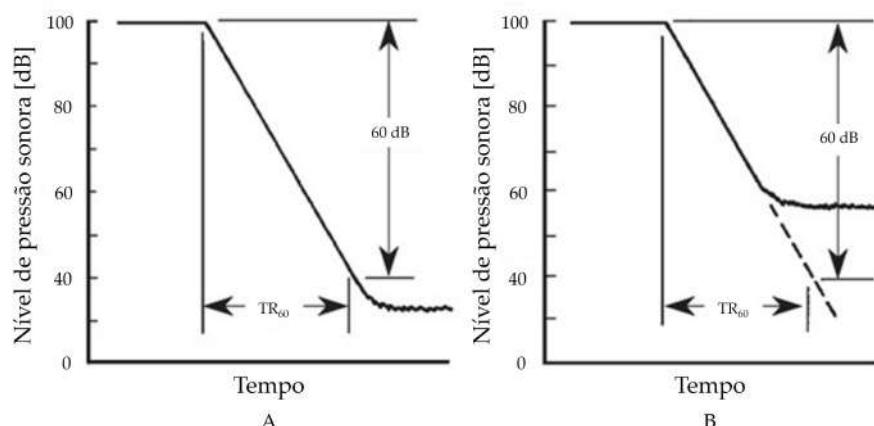


Figura 3.12: Gráfico a ser obtido de modo a obter o decaimento sonoro. Adaptado de [19].

Como foi referido anteriormente, os valores obtidos do tempo de reverberação devem ser inferiores a 1,2 s.

3.5 Determinação dos parâmetros acústicos

3.5.1 Tempo de reverberação

Relativamente à obtenção dos dados experimentais do tempo de reverberação, recorreu-se a medições dos níveis da pressão sonora em tempo real de dois tipos de fonte sonora: o rebentamento de balões e ainda a emissão de ruído derivado de uma coluna. Utilizaram-se estes dois tipos de fontes, de modo a comparar os valores e perceber se a diferença entre estes é de facto muito diferente. Consideraram-se duas posições diferentes no espaço para as fontes sonoras e, para cada medição, repetiu-se duas vezes o procedimento.

Em ambos os métodos, excitou-se o suficiente o campo sonoro de modo a o decaimento ser visível no gráfico. Após o término da excitação do espaço, obtiveram-se os valores do nível de pressão sonora lidos em tempo real através do sonómetro. O objetivo foi ter um gráfico com uma reta com declive negativo para retirar o tempo necessário que demorou a diminuir 60 dB, como se pode observar pela figura 3.12.

No entanto, a diferença entre o valor máximo do nível de pressão sonora, quer seja derivado da coluna ou do rebentamento do balão, e o valor do nível de pressão sonora derivado do ruído de fundo não foi 60 dB após interromper a fonte e, portanto, em vez de se obter um decaimento para 60 dB, escolheu-se um decaimento de 30 dB, que dá para extrapolar do T_{30} para o T_{60} [43].

Para obter T_{30} , tem de se retirar dois valores das ordenadas da leitura do gráfico: 5 dB abaixo do valor correspondente ao nível de pressão sonora máximo (fonte) e ainda 35 dB abaixo do valor do nível de pressão sonora máximo (fonte). Para além disso, foi necessário adquirir a linha de tendência linear, incluindo o declive do decaimento e perceber através

desta reta, o valor da abcissa (tempo relativo, em s) dos dois pontos anteriormente referidos. T_{30} foi a diferença entre estes dois valores do tempo (t_1 e t_2) e multiplicando por 2 deu T_{60} . O valor mínimo corresponde ao valor do ruído ambiente.

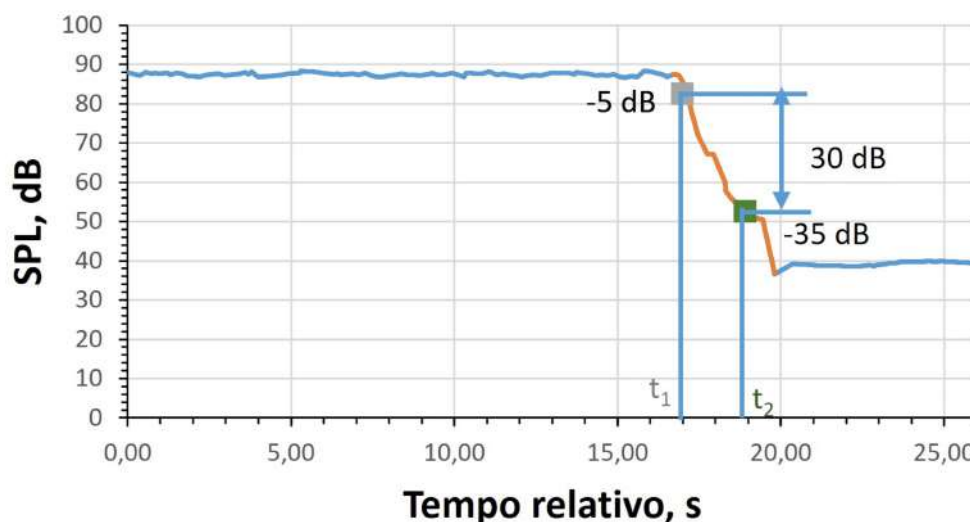


Figura 3.13: Exemplo de uma curva de decaimento obtida nas medições experimentais de modo a obter T_{60} .

Primeiramente, provocou-se uma excitação muito forte do campo sonoro no espaço de modo a obter um decaimento visível do nível de pressão sonora [26]. Esta excitação foi obtida através do rebentamento do balão.

Em relação ao segundo tipo de fonte sonora, recorreu-se ao *software* REW anteriormente referido, de modo a gerar ruído cor de rosa aleatório [19] nas bandas de oitava centradas nas frequências 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz e este ruído foi emitido pela coluna já referida no capítulo 3.3. No entanto, é a considerar que os valores poderão não ser os mais corretos, pois o altifalante a ser utilizado deveria ter sido omnidirecional, ou seja, o som não deveria ter sido direcionado, mas sim espalhado por todas as direções [26]. De modo a obter o decaimento sonoro, desligou-se a fonte após o campo sonoro ter estabilizado. A este processo chama-se método do ruído interrompido.

Tanto o balão como a coluna, ambos utilizados para produzir ondas sonoras foram colocados a uma altura de 2,2 m. O sonómetro foi colocado a uma altura de 1,2 m na posição 1 e 1,2 m na posição 2.

As medições foram realizadas com o espaço inocupado, com a mobília habitual e nos locais habituais e com as máquinas desligadas de modo a haver o menor ruído de fundo possível. Para além disso, as portas e as janelas estavam fechadas, com o objetivo também, de reduzir o ruído de fundo. É importante referir também que para cada medição realizada, o sonómetro foi calibrado. O tempo de reverberação final foi a média dos tempos obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz.

As especificações do sonómetro para estas medições foram:

- Ponderação temporal "*fast*";
- Curva de ponderação A;
- Intervalo de medições entre 30 e 130 dB, de modo a obter-se o maior intervalo possível de valores.

3.5.2 Nível de pressão sonora

Nesta secção dedicou-se à obtenção das variações do nível de pressão sonora ao longo de um dia de trabalho e ainda de dados experimentais com o objetivo de serem utilizados nas simulações numéricas.

Primeiramente, as medições feitas durante o horário de trabalho, deram início às 9h00 e terminaram às 16h50. O sonómetro foi colocado na posição 2 (ver figura 3.11) direcionado para a zona das refeições, como se pode observar pela figura 3.14. Realizou-se este tipo de análise de modo a confirmar as horas de maior ruído mencionadas pelas funcionários e, ainda, obter o valor do nível de pressão sonora equivalente. Calculou-se o nível de pressão sonora equivalente através da equação (3.5) em que o número total de amostras (N) foi aquele que o sonómetro gravou.

$$L_p \text{ médio} = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{N=1}^N 10^{\frac{L_p N}{10}} \right) \quad (3.5)$$



Figura 3.14: Posição 2 do sonómetro para obtenção do SPL ao longo de um dia de trabalho.

Relativamente aos dados experimentais utilizados nas simulações numéricas, realizaram-se medições do nível de pressão sonora a 1,725 m da coluna, direcionadas para a posição 1, de modo a obter o valor do nível de pressão sonora a 1 m, através da fórmula apresentada na equação (3.6). Calculou-se para 1 m de modo a ser o valor mais aproximado ao valor emitido pela coluna, uma vez que para uma distância menor que 1 m, o campo sonoro é mais crítico, pois há zonas de sobreposição de ondas sonoras e ainda zonas de transição [44] e, apenas, após 1 m, circulam as ondas sonoras emitidas pela coluna. Na equação (3.6), SPL_2 corresponde ao valor obtido a d_2 (1,725 m) e d_1 corresponde a 1 m. Realizou-se 1 medição para cada frequência (250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz), com a intensidade do som a ser emitido pela coluna sempre no mesmo valor.

$$SPL_2 = SPL_1 - 20 \log \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \quad (3.6)$$

Para além disso, realizaram-se medições nas posições 1 e 2, para as condições anteriormente referidas com o objetivo de obter o valor do nível de pressão sonora. Estes valores foram comparados com os valores adquiridos nas simulações numéricas. Ou seja, para o som emitido na coluna, por exemplo a uma frequência de 250 Hz, foi necessário adquirir os valores SPL nas posições mencionadas. Os valores finais obtidos foram calculados

através de uma média logarítmica, que se encontra representada na equação (3.5), em que N é o número total de amostras i medidas pelo sonómetro e SPL_i é o nível de pressão sonora de cada amostra.

As especificações do sonómetro para estas medições foram:

- Ponderação temporal "*fast*";
- Curva de ponderação A;
- Intervalo de medições entre 30 e 130 dB, de modo a obter-se o maior intervalo possível de valores.

3.5.3 Resposta em frequência

De forma a perceber a resposta do espaço a diferentes frequências, efetuou-se uma gravação com um telemóvel numa hora de maior ruído, o almoço. De seguida com o *software Spyder*, desenvolveu-se um código, de modo a realizar uma Transformada rápida de *Fourier* nos dados gravados, com o objetivo de obter um gráfico Magnitude vs Frequência.

A Transformada de *Fourier* transforma um sinal acústico em função do tempo numa soma de sinusoides, ou então, dito de outra forma, numa magnitude (em *dB*) em função da frequência. A equação (3.7) define esta técnica matemática e o resultado obtido indica a amplitude que cada frequência tem [26].

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad (3.7)$$

MODELAÇÃO NUMÉRICA

4.1 Descrição do modelo

Nesta secção são apresentadas as especificações do modelo *Harmonic Acoustics* do *Ansys Workbench*, tais como a geometria considerada, a malha, os coeficientes de absorção e ainda a fonte sonora e as soluções desejadas a serem obtidas.

4.1.1 Domínio computacional

Na figura 4.1 encontra-se a representação simplificada do modelo 3D do espaço de restauração, realizada no *software SolidWorks*. É a considerar que a geometria de toda a mobília baseou-se principalmente em paralelepípedos ou na junção de um ou mais paralelepípedos, com exceção do formato do próprio espaço de restauração, que foi baseado na planta fornecida no anexo A.1. Para além disso, foi necessário retirar os pés de cadeiras, mesas e bancadas. Isto foi realizado com o objetivo de simplificar o modelo dos Elementos Finitos. As dimensões de toda a representação são múltiplos de 60 mm. O porquê desta dimensão será explicado na secção 4.1.2.

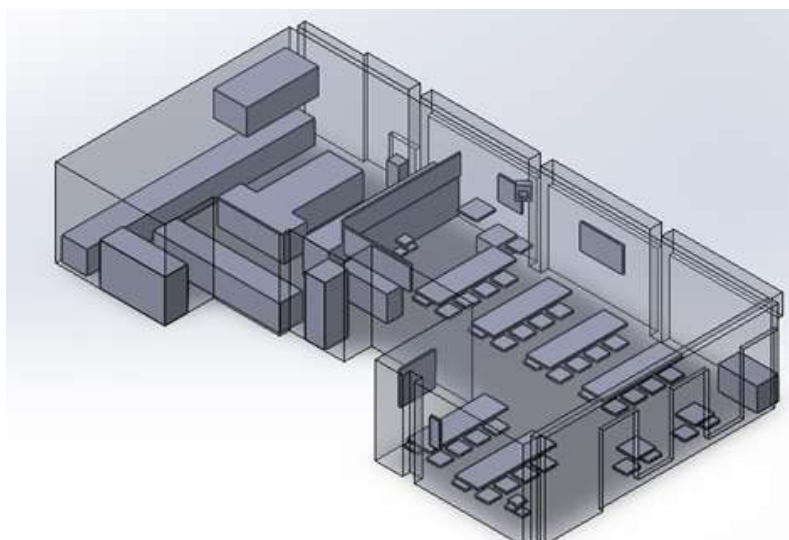


Figura 4.1: Modelo 3D simplificado do espaço de restauração em estudo, no *software SolidWorks*.

No *software Ansys Workbench*, mais especificamente, no "*Design Modeler*" realizou-se uma operação "*Boolean*" de modo a subtrair toda a mobília à geometria baseada na planta, com o objetivo de apenas obter um único volume composto pelo fluído em estudo, o ar.

Na tabela 4.1 encontram-se as propriedades do ar. As propriedades fundamentais para a realização de simulações são a velocidade do som no meio e a massa volúmica.

Tabela 4.1: Propriedades do ar consideradas nas simulações numéricas.

Temperatura (°C)	22
Velocidade do som no ar (m/s)	346,25
Massa Volúmica (kg/m ³)	1,225

4.1.2 Malha de elementos finitos

Relativamente à malha, no modo "*Mechanical*" a dimensão do elemento foi 60 mm, uma vez que devido ao poder computacional existente, o limite máximo em que se conseguiu obter uma malha foi 60 mm, não respeitando deste modo as regras definidas pelo *Ansys*, que são mencionadas na subsecção 2.1.3. Aplicou-se um "*Face meshing*" a todas as faces existentes e, ainda, "*Hex dominant method*", de modo a garantir a melhor qualidade possível desta e, consequentemente, melhores resultados. Na Figura 4.2, observa-se a malha que se obteve e a qual foi considerada para a realização de todas as simulações.

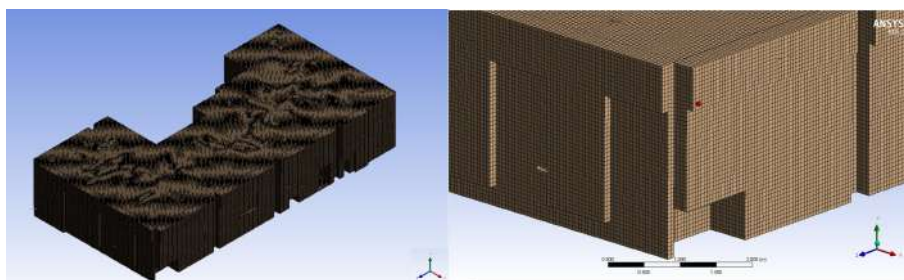


Figura 4.2: Malha obtida de acordo com as configurações mencionadas.

Segundo o manual do Ansys, há dois critérios para avaliar a qualidade da malha: *skewness* e qualidade ortogonal, em que os valores que indicam maior qualidade são entre 0 e 0,25 e entre 0,95 e 1, respectivamente [45]. *Skewness* é a distorção angular e a qualidade ortogonal é caracterizada pelo elemento [45]. Na figura 4.3 observa-se que para um número elevado de elementos ($1,01e+06$), a qualidade ortogonal foi de 0,95, para elementos do tipo hexagonal (Hex20), que é o tipo de elemento mais desejado.

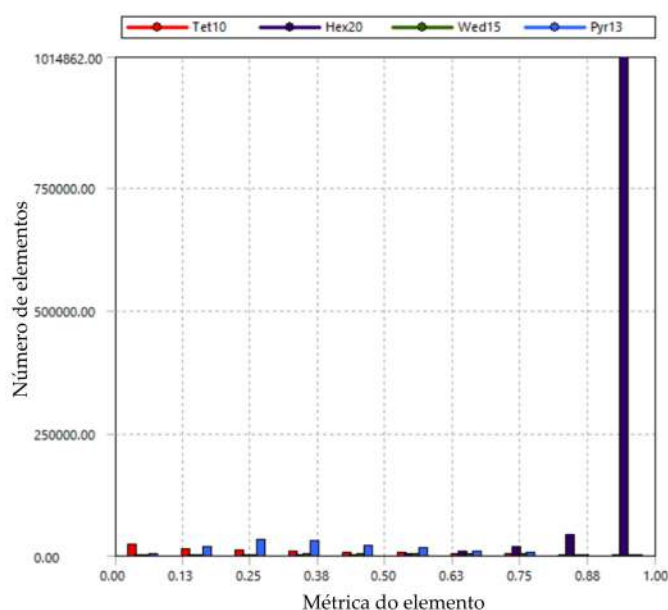


Figura 4.3: Gráfico obtido do *Ansys Workbench* da qualidade ortogonal da malha obtida.

4.1.3 Coeficientes de absorção

Os coeficientes de absorção foram fundamentais para obter os melhores resultados possíveis. No entanto, salienta-se que não foi possível ter acesso direto a esta informação da mobília e os coeficientes utilizados foram baseados em pesquisa.

Aplicou-se coeficientes de absorção nos quadros de tela de pano e no quadro de borracha devido às superfícies destes terem características porosas e, portanto, terem capacidade de absorção das ondas sonoras. Definiu-se também no acrílico devido à importância da localização deste no espaço, ou seja, destes servirem de barreira entre a cozinha e o espaço de refeição. À restante mobília não foram atribuídos os coeficientes,

uma vez que apresentam superfícies polidas e, portanto, têm uma capacidade muito mais refletora do que absorvente [26].

Apenas são apresentados nesta secção os coeficientes de absorção da mobília que têm presença constante ao longo de todas as simulações.

Os coeficientes de absorção das ondas sonoras do quadro de tela de pano, do quadro de borracha e do acrílico encontram-se na tabelas 4.2. É de referir novamente que se assumiram estes valores com base em pesquisa e no que mais se assemelha à realidade.

Tabela 4.2: Coeficientes de absorção em função da frequência para simulação numérica.

Objeto	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Quadro de tela de pano [46]	0.01	0.005	0.01	0.11	0.21
Quadro de borracha [47]	0.05	0.08	0.08	0.22	0.2
Acrílico [48]	0.01	0.01	0.015	0.03	0.042

Na Figura 4.4, encontram-se as localizações da mobília anteriormente referida, em que 1, 2 e 3 são os quadro de tela de pano, o quadro de borracha e o acrílico, respetivamente.

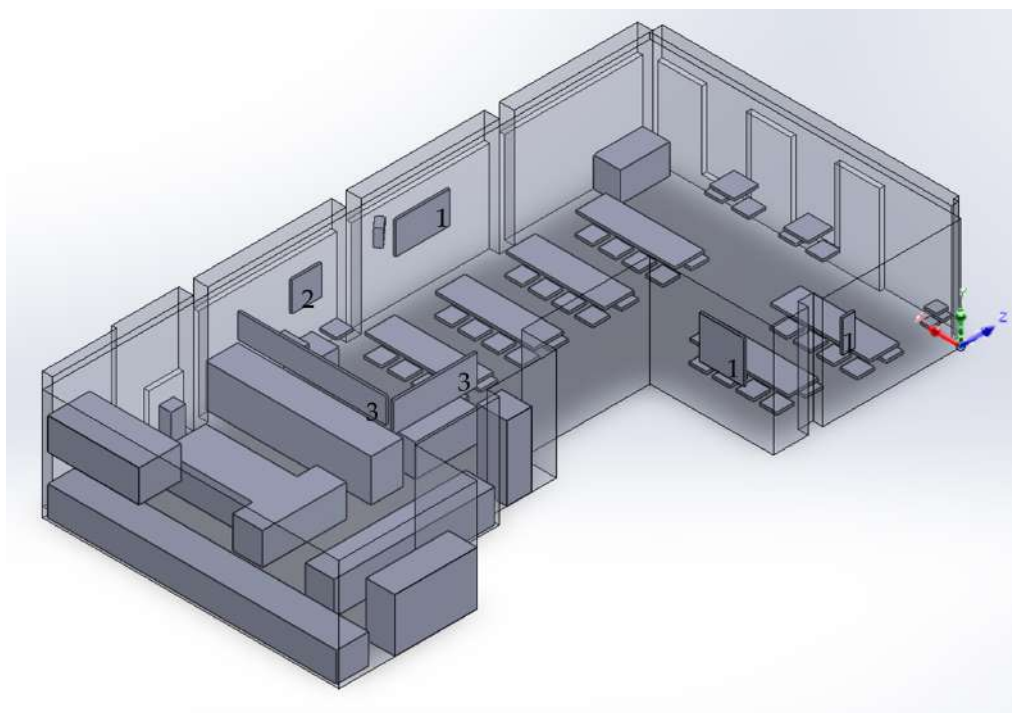


Figura 4.4: Modelo 3D e localizações da mobília no *software SolidWorks*.

4.1.4 Fonte sonora

Relativamente às fontes sonoras, considerou-se "*Incident Wave Source*", mais especificamente "*Back Enclosed Loudspeaker*", em que a excitação foi feita dentro da geometria através de uma pressão sonora.

Como será referido no capítulo 5.3, a pressão sonora a considerar nas simulações derivou das medições experimentais. Na tabela 4.3 encontram-se os valores da pressão sonora para cada frequência considerada. A pressão sonora (obtida através da equação (2.6)) foi definida na posição FS onde se encontra a coluna que é a $(x, y, z) = (7; 2,4; 7)$ (m).

Tabela 4.3: Valores da pressão sonora para excitação do campo sonoro.

Frequência (Hz)	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Pressão sonora (Pa)	0.066	0.292	0.112	0.632

A frequência foi definida no "*Analysis settings*" e para cada frequência o intervalo da solução foi 1.

4.1.5 Soluções a obter

Relativamente às especificações das soluções desejadas, definiu-se que se pretendia "*A-Weighted Sound Pressure Level*" para as posições 1 e 2 e ainda para toda a geometria.

Na tabela 4.4 encontram-se os intervalos do nível de pressão sonora mais desejável, e, ainda, o mais aceitável e inaceitável para o caso do espaço de restauração [7]. Estes intervalos condicionaram a escolha da solução mais adequada.

Tabela 4.4: Intervalo do SPL mais adequado, aceitável e inaceitável para um espaço de restauração [7].

Intervalo do SPL_A (dBA)	
Desejável	55 - 60
Aceitável	60 - 65
Inaceitável	65 - 70

4.2 Soluções de atenuação de ruído consideradas

Os restaurantes são considerados espaços em que a boa comunicação é um fator imprescindível para uma boa satisfação dos clientes e dos funcionários e, consequentemente, é fundamental perceber as soluções existentes nos dias de hoje de forma a combater o ruído e quais as que obtém o melhor resultado possível [7].

4.2.1 Escolha das soluções a estudar

De seguida, são mencionadas possíveis aplicações no mercado a serem colocadas na Casa do Pessoal. Ainda são indicadas as localizações, vantagens e desvantagens de cada uma e ainda o valor monetário de cada produto. Na tabela 4.5 encontram-se os coeficientes de absorção para cada material mencionado nesta secção.

1. Uso de espumas acústicas nas arestas e cantos

Relativamente a espumas acústicas pode encontrar-se na SKUM ACOUSTICS, bass traps triangulares (bass traps - bons absorventes de baixas frequências), com um valor de 42,25 € por uma unidade. Este produto (MOCKA BT) é feito de uma espuma acústica ignífuga Basotect (marca registada da BASF SE) e, segundo a empresa, tem uma capacidade elevada de absorver ondas sonoras, principalmente nas baixas frequências. No entanto, também apresenta um coeficiente de absorção suficientemente elevado para o restante espectro. Para além disso, a durabilidade do produto é elevada e o comportamento face ao fogo é M1. Esta espuma pode ser colocada nas arestas e cantos, que, como foi mencionado anteriormente, são pontos muito importantes para a elevada absorção das ondas sonoras [49]. Na Figura 4.5 observa-se um exemplo da espuma.

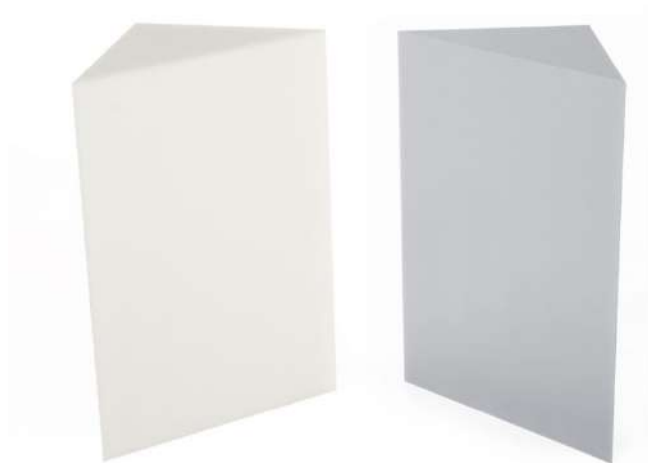


Figura 4.5: Espuma da empresa SKUM ACOUSTICS [49].

Esta espuma acústica é feita de resina de melamina de célula aberta e, o que define a eficácia deste material relativamente à absorção das ondas sonoras, é o facto de a melamina ser composta por uma superfície com orifícios. Deste modo, as ondas sonoras não refletem e são absorvidas pela própria espuma [50]. As dimensões são $300 \times 300 \times 600$ mm.

Relativamente a espumas acústicas mais económicas, a opção mais viável é a da *Geeepro* em poliuretano (disponível na *Leroy Merlin*), com um custo de 5€ por unidade. Devido à sua estrutura porosa, esta tem uma elevada capacidade de absorver as ondas sonoras, que, como foi mencionado no capítulo 2.1.2, é o que define a eficácia da absorção. Para além disso, a espuma tem como característica alta resistência ao fogo [51, 52]. Um exemplo desta espuma pode ser observado na Figura 4.6. A *Leroy Merlin* não disponibiliza os coeficientes de absorção em função da frequência, portanto, consideraram-se os valores de uma espuma em poliuretano que se encontraram na literatura [49], como se pode observar na tabela 4.5.



Figura 4.6: Espuma mais económica em poliuretano da empresa *Geepro* [51].

Para a realização das simulações numéricas, considerou-se a utilização da espuma acústica da *Skum Acoustics* e não da *Leroy Merlin*, pois os coeficientes de absorção sonora da espuma MOCKA BT são muito superiores em comparação com a opção mais económica.

2. Uso de mobília e cortinas e espumas acústicas

Como já tinha sido referido no capítulo 2.1.2, o uso de mobília e de cortinas é uma forma de diminuir o tempo de reverberação. Relativamente a mobília, uma solução possível é a substituição das cadeiras já existentes por cadeiras acolchoadas. Para além disso, a colocação de cortinas ao longo de janelas também contribui para a absorção das ondas sonoras.

As cadeiras e as cortinas podem ser adquiridas na empresa IKEA, cujo valor monetário é acessível em comparação com as soluções anteriormente referidas, 19,99 € por unidade para ambos [53, 54]. As cadeiras são acolchoadas e as cortinas são de algodão, deste modo ocorre absorção das ondas sonoras. As dimensões da cortina são 145×300 cm. Observa-se nas figuras 4.7 e 4.8, representações das cadeiras e cortinas a considerar para esta solução.



Figura 4.7: Cadeira acolchoada do IKEA [53].



Figura 4.8: Cortina de algodão do IKEA [51].

Os coeficientes de absorção sonora da cadeira acolchoada sem estar ocupada e da cortina de algodão vincada a 75 % e a uma distância de 13 cm da parede encontram-se na tabela 4.5.

3. Uso de painéis de diferentes materiais

Recentemente, o uso de materiais naturais tem sido considerado para a absorção das ondas sonoras, uma vez que, se pode tratar de uma opção muito mais viável em termos económicos, em comparação com os restantes produtos existentes no mercado. Se estes painéis forem construídos em laboratório da faculdade, o preço diminui ainda mais, pois apenas tem de se comprar a matéria prima. Para além disto, os materiais naturais existem em maior quantidade. Alguns exemplos destes materiais são madeira, palha, lã de ovelha, cartão reciclado e ainda cortiça. Em comparação com as soluções anteriormente propostas, estas têm um menor custo não só em termos económicos como ambientais [55, 56]. Para além destes materiais, também

se recorre usualmente a painéis feitos de caixas de ovos de papel, principalmente em situações mais amadoras de melhoria do ambiente acústico. Cada caixa de ovos tem umas dimensões de 150 x 105 x 70 mm. No entanto, é de notar que a maior desvantagem destes materiais é a baixa resistência ao fogo. É uma solução com massa e porosidade pouco significativa, pelo que na verdade não deverá produzir o efeito esperado. Porém, é uma solução que é considerada noutros estudos, talvez pela tentação que representaria uma tal solução de baixo custo.

Relativamente aos materiais anteriormente referidos, decidiu-se aplicar nas simulações numéricas painéis de caixas de ovos, uma vez que é de fácil acesso e de baixo custo. Neste caso, seria necessário obter caixas de ovos com pequenas aberturas e colá-las umas às outras, de modo a garantir que as caixas se encontram fechadas e com a superfície da base da caixa virada para o interior do espaço [57]. O modo de colagem seria com super-cola. Nesta situação, os coeficientes de absorção são os que estão mencionados na tabela 4.5.

Outro tipo de painel a ser aplicado nas paredes e tetos do modelo 3D é o painel Kino Soft com um custo de 44,50 € por unidade. É um painel absorvente acústico decorativo que reduz a reverberação. Na figura 4.9 encontra-se a representação deste produto que pode ser adquirido na Skum Acoustics [58]. A espuma deste painel é ZHFR28, tem um acabamento têxtil e, ainda, a capacidade de retardar a propagação das chamas.



Figura 4.9: Painel Kino Soft da Skum Acoustics [58].

Para além destas duas opções poderia ter-se considerado painéis feitos de lã mineral ou de palha. Relativamente aos de lã que já foram mencionados no capítulo 2.1.2 como um bom absorvente de ondas sonoras, estes também são bons isolantes térmicos e podem ser comprados na GIK ACOUSTICS com um custo de 47 € por painel com dimensões de 600 x 600 mm[59]. Está representado exemplos deste tipo de painel na figura 4.10. Tem que se ter em conta que o painel de lã tem um custo monetário muito elevado, uma vez que é comprado através de empresas especializadas na área da acústica. No entanto, se for comprado a matéria prima e este for comprimido num laboratório da faculdade, o custo reduziria significativamente e os resultados continuariam a ser favoráveis [56]. Relativamente aos painéis de

palha estes também podem ser uma opção se também forem feitos em laboratório da faculdade.

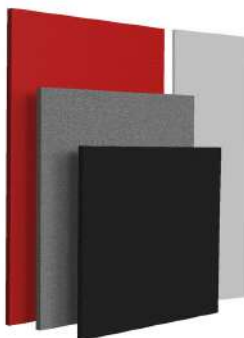


Figura 4.10: Painel da GIK ACOUSTICS [59].

Os coeficientes de absorção destes materiais podem ser observados na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Coeficientes de absorção dos materiais considerados para medidas corretivas.

Objeto	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
MOCKA BT [49]	0.93	1.24	1.22	1.14	1.10
Espuma de poliuretano [49]	0.25	0.50	0.85	0.95	0.90
Cadeira acolchoada [60]	0.07	0.12	0.26	0.42	0.50
Cortina de algodão [60]	0.30	0.45	0.65	0.56	0.59
Palha comprimida [56]	0.21	0.25	0.63	0.96	0.92
Painéis de lã mineral [59]	0.39	0.83	1.17	1.02	1.02
Painéis de caixas de ovos [57]	0.08	0.24	1.05	0.7	0.75
Painéis Kino Soft [58]	0.20	0.53	0.80	0.85	0.90

Na tabela 4.6 encontra-se a comparação entre os produtos anteriormente referidos. Os parâmetros considerados para definir uma solução foram o material, preço, durabilidade, estética, resistência às chamas e, ainda, os coeficientes de absorção. O que se pretende é materiais com uma relação preço/qualidade o mais favorável possível e, observa-se que os painéis Kino Soft, de lã mineral e a espuma MOCKA BT são aqueles que apresentam maior qualidade relativamente a todos os parâmetros, mas principalmente nos valores dos coeficientes de absorção. No entanto, o custo destes é muito superior em relação aos restantes. Os painéis de caixas de ovo e de palha são aqueles que apresentam coeficientes de absorção relativamente altos com um preço bastante reduzido, com a desvantagem de a durabilidade e resistência às chamas serem muito reduzidas.

Tabela 4.6: Comparação entre as várias soluções propostas.

Soluções aplicadas nas simulações	Parâmetros de cada produto					
	Material	Preço	Durabilidade	Estética	Resistência (chamas)	Coef. de absorção
MOCHA BT, Skum Acoustics	Resina de melamina	+	++	o	+	++
Cadeiras acolchoadas	Assento: espuma de poliuretano	o	+	+	-	o
Cortina	Algodão	o	+	+	-	o
Painéis de caixas de ovos	Papel	--	-	--	-	+
Painéis Kino Soft, GIK ACOUSTICS	Espuma ZH FR28 e poliuretano	+	++	++	+	++
Possíveis soluções						
Espuma da Geepro	Poliuretano	-	o	o	o	+
Painéis de lã mineral, GIK ACOUSTICS	Lã	++	++	+	+	++
Painéis de palha	Palha	-	-	-	-	+

4.2.2 Aplicação de soluções ao caso de estudo

De modo a perceber qual a quantidade ideal de cada solução a colocar e respetiva localização, foram realizadas várias simulações. Os valores do nível de pressão sonora e da frequência da fonte são os mesmos que foram obtidos nas medições experimentais em que nenhuma solução foi aplicada (tabela 4.3). É de notar que se evitou colocar painéis ou espumas nas paredes da zona da cozinha visto que estas estão ocupadas por equipamentos ou móveis ou mesmo devido a motivos sanitários.

1. Solução n.º 1

A primeira solução é a colocação de MOCHA BT nas arestas e cantos das paredes que não têm janelas. Representa-se na figura 4.11, os locais anteriormente indicados com a cor verde. Estas paredes foram as escolhidas, de modo a respeitar o não paralelismo de paredes não tratadas, ou seja, a uma parede não tratada opõe-se sempre uma parede tratada, como foi mencionado no capítulo 2.1.2. Na figura 4.12 encontra-se a representação da espuma, que tem dimensões $300 \times 300 \times 600$ mm no *software SolidWorks*. É de notar que os custos monetários não incluem o custo da montagem.

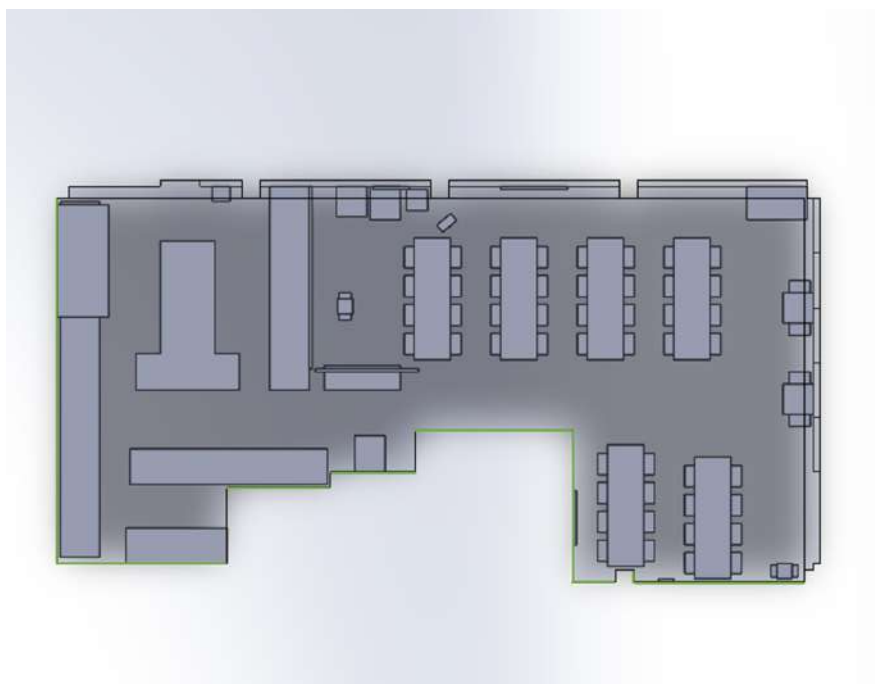


Figura 4.11: Paredes onde a espuma da empresa SKUM ACOUSTICS foi colocada nas simulações numéricas.

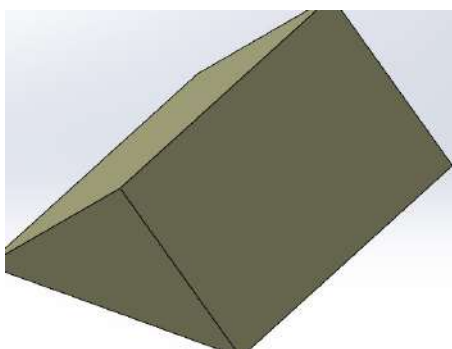


Figura 4.12: Representação da espuma acústica MOCKA BT.

Na primeira proposta foram aplicadas 8 unidades, como se pode verificar na figura 4.13. Os coeficientes de absorção considerados encontram-se na secção anterior. Esta solução tem um valor de 326 € com IVA. [49]

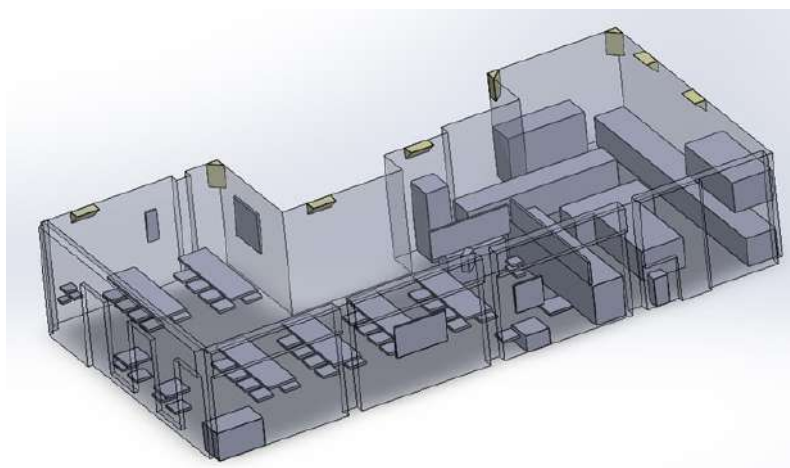


Figura 4.13: Representação das 8 unidades nas paredes do espaço.

Na segunda proposta foram utilizadas 16 unidades com as mesmas dimensões do caso anterior. A única alteração foi o aumento de unidades em locais diferentes, como se pode observar na Figura 4.14. Neste caso, o valor monetário é de 495 € com IVA [49]. Houve necessidade de aumentar o número de unidades devido ao nível de pressão sonora não ter reduzido significativamente.

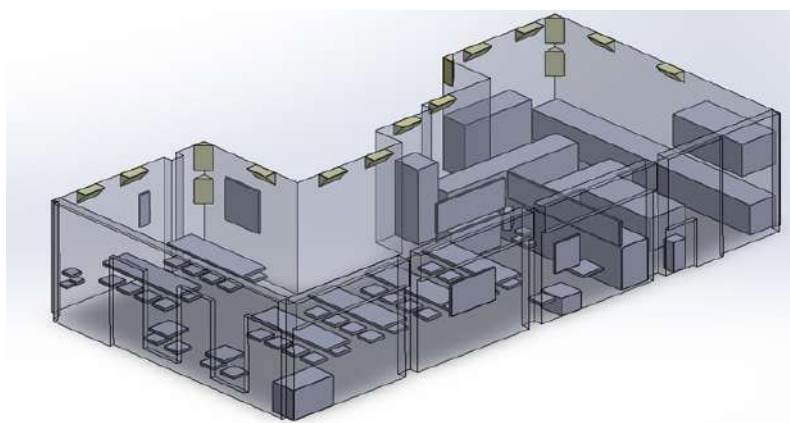


Figura 4.14: Representação das 16 unidades nas paredes do espaço.

Observou-se que mesmo assim seria necessário a colocação de mais espumas acústicas. Foram realizadas mais duas simulações em que foram colocadas 28 e 32 unidades nas paredes mencionadas na figura 4.11, que correspondem à terceira e quarta propostas, respetivamente. Nas figuras 4.15 e 4.16 encontram-se as representações destas duas situações. Os custos têm um valor de 1147 € com IVA e de 1304 € com IVA para a situação com 28 e 32 unidades, respetivamente.

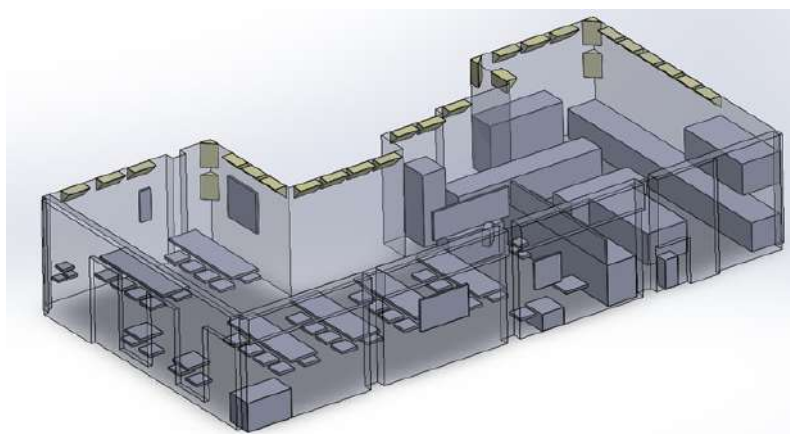


Figura 4.15: Representação das 28 unidades nas paredes do espaço.

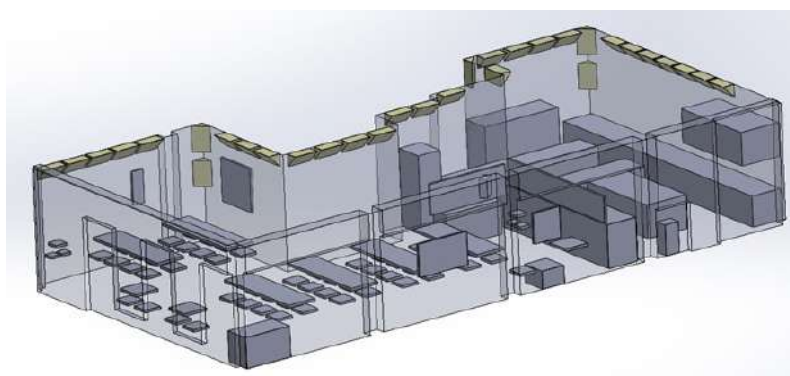


Figura 4.16: Representação das 32 unidades nas paredes do espaço.

Caso se realizasse simulações numéricas com a espuma da *Leroy Merlin* seria necessário a colocação de mais unidades em comparação às 32 unidades do MOCKA BT, pois os coeficientes de absorção são inferiores aos considerados.

2. Solução n.º 2

Para esta solução, a primeira proposta é a colocação de 52 cadeiras acolchoadas substituindo as antigas e 4 cortinas a serem colocadas na parede em que se encontra a porta. O modelo 3D da cortina tem dimensões de 145 x 300 cm e têm que estar 75 % vincadas, de modo a terem os coeficientes de absorção referidos na secção anterior. O modelo 3D da cadeira acolchoada tem as mesmas dimensões das cadeiras anteriormente existentes. O custo desta solução seria de 1119,44 € com IVA incluído. Considera-se ainda que a distância entre a cortina e a superfície refletora é 120 mm, em vez dos 130 mm, de modo a que a dimensão do elemento respeite a regra de ser múltiplo de 60 mm. Na figura 4.17 encontra-se representado a localização das cortinas (a roxo) e das cadeiras acolchoadas (a verde).

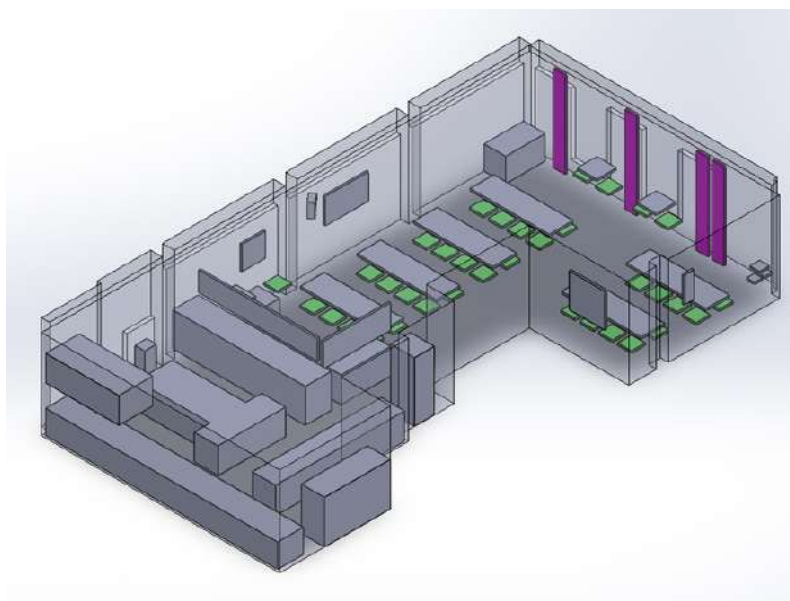


Figura 4.17: Representação da localização das cadeiras acolchoadas e das cortinas.

A segunda proposta é a colocação de 14 painéis acústicos Kino Sofft no teto para além das alterações da primeira proposta. O custo desta proposta seria de 1742,44 €. Na figura 4.18 observa-se a representação desta proposta. Os painéis Kino Soft encontram-se representados com a cor vermelho.

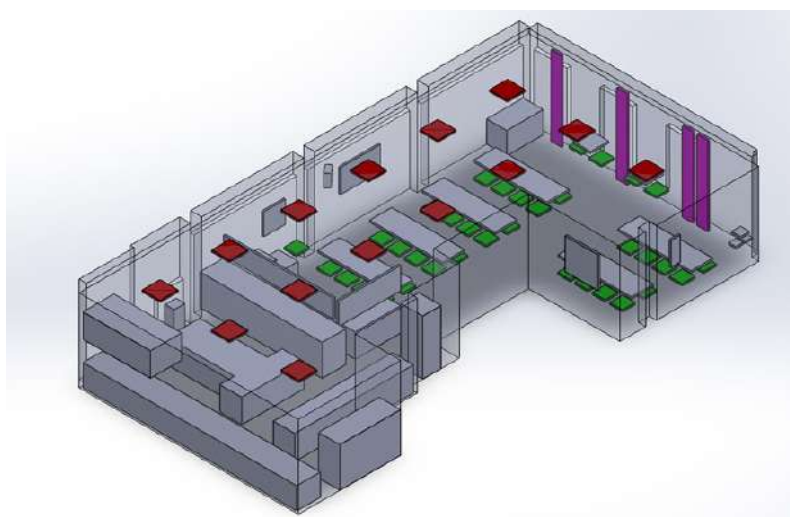


Figura 4.18: Representação da localização das cadeiras acolchoadas, das cortinas e dos painéis Kino Soft.

Como os resultados ainda não foram os mais favoráveis, a terceira proposta baseou-se em tirar as cortinas e em acrescentar 6 unidades de Kino Soft no teto do modelo, tendo portanto um total de 52 cadeiras acolchoadas e 20 unidades de Kino Soft. Na figura 4.19 encontra-se a representação do modelo 3D desta solução. O custo total teria um valor de 1929,48 €. Retiraram-se as cortinas, pois estas ocupavam

uma menor área em comparação com as cadeiras acolchoadas, deste modo, o custo reduziu.

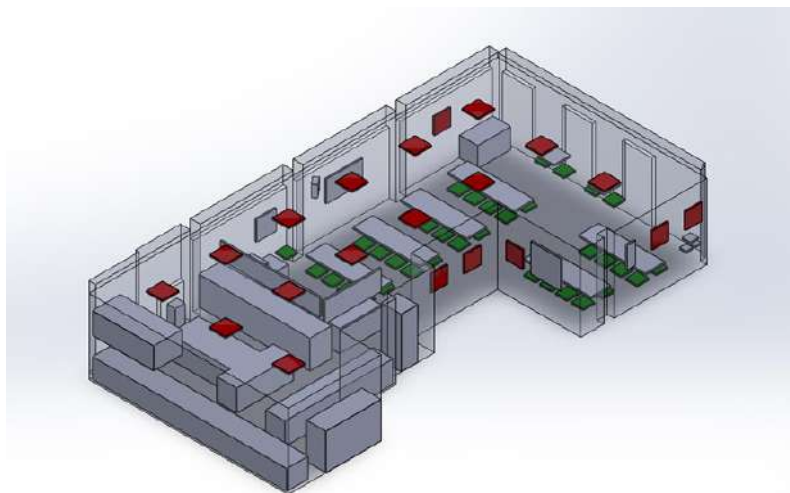


Figura 4.19: Representação da localização das cadeiras acolchoadas e dos painéis Kino Soft.

Como os resultados numéricos obtidos ainda não foram os mais favoráveis, retiraram-se as cadeiras acolchoadas e considerou-se apenas a colocação de painéis Kino Soft, uma vez que o custo destas propostas já se encontram com um valor muito elevado e deixa de ser uma solução economicamente viável. Portanto, para esta proposta apenas foram colocados no modelo 3D 25 unidades dos painéis Kino Soft, o que tem um custo de 1112,5 €. Na figura 4.20 encontra-se a representação desta proposta. Colocaram-se mais painéis na zona da refeição, uma vez que, os resultados obtidos da proposta anterior demonstraram valores mais elevados do SPL na posição 1 do que na posição 2, nas frequências de 250 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz.

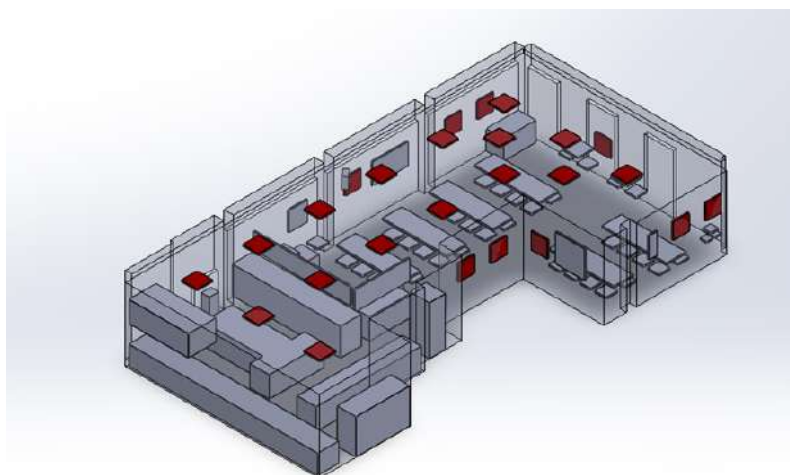


Figura 4.20: Representação da localização dos 25 painéis Kino Soft.

3. Solução n.º 3

Na primeira proposta foram colocados apenas 42 painéis feitos de caixas de ovos. Para as simulações numéricas consideraram-se painéis com o seguinte tamanho: um comprimento e largura de 600 mm e uma espessura de 60 mm, de modo a que as dimensões respeitassem a regra do tamanho do elemento ser múltiplo de 60 mm. São necessárias 24 caixas de ovos para cada painel. Considerou-se uma distribuição uniforme destes painéis em todo o espaço. Na figura 4.21 encontra-se a distribuição destes painéis no modelo 3D.

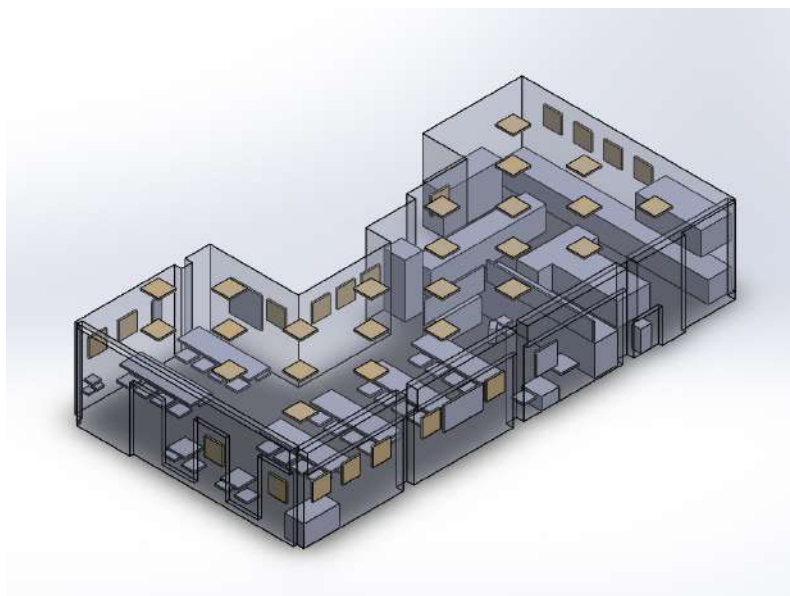


Figura 4.21: Representação da localização dos 42 painéis de caixas de ovos.

A segunda proposta é retirar 24 painéis de caixas de ovos e colocar 19 painéis Kino Soft, pois os resultados da proposta n.º 1 não foram os mais favoráveis. Manteve-se

o uso deste painel pois a relação custo/qualidade é a mais favorável. O custo desta proposta tem um valor de 845,5 € sem contar com as caixas de ovos. Na figura 4.22, encontra-se representado a localização dos painéis. Os painéis de caixas de ovos têm uma cor castanha e os restantes têm uma cor vermelha.

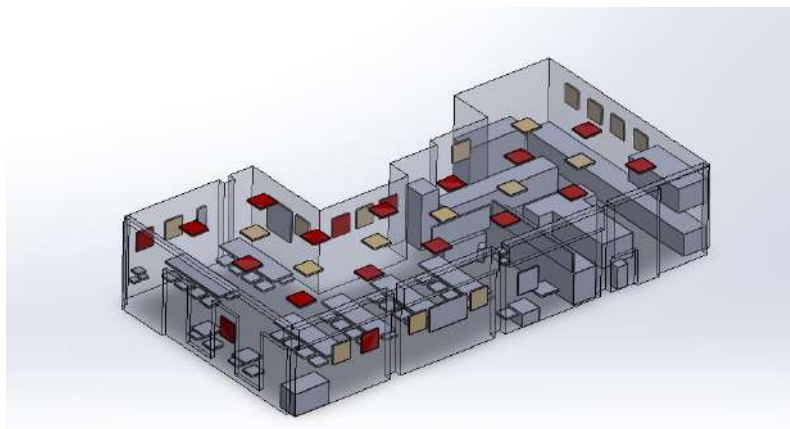


Figura 4.22: Representação da localização dos 19 painéis Kino Soft e 18 painéis de caixas de ovos.

Na terceira proposta foram colocados mais 5 painéis Kino Soft e retirados 11 painéis de caixas de ovos. O custo desta proposta teria um valor de 1068 €. Na Figura 4.23 encontra-se a representação do modelo 3D com as soluções aplicadas.

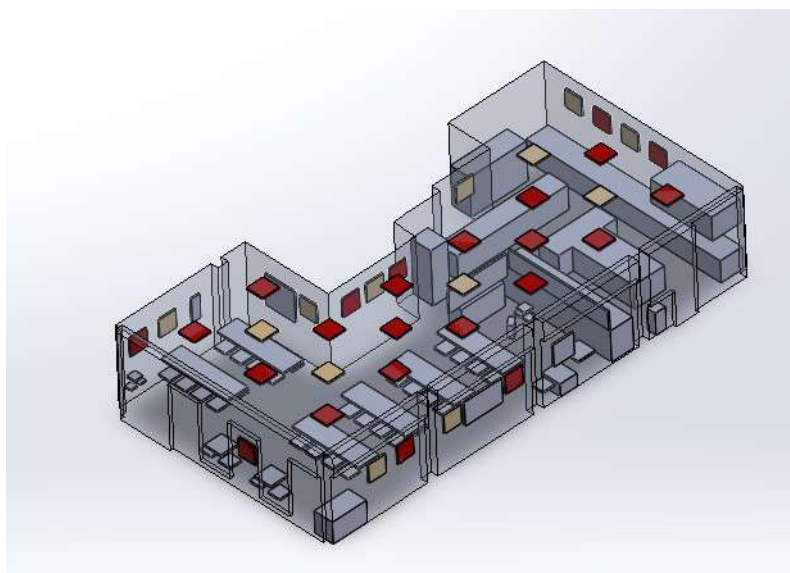


Figura 4.23: Representação da localização dos 24 painéis Kino Soft e 13 painéis de caixas de ovos.

Por último, retiraram-se 3 painéis de caixas de ovos e acrescentaram-se 3 painéis Kino Soft. O custo teria um valor de 1201,50 €. Na Figura 4.23 encontra-se a representação do modelo 3D com as soluções aplicadas.

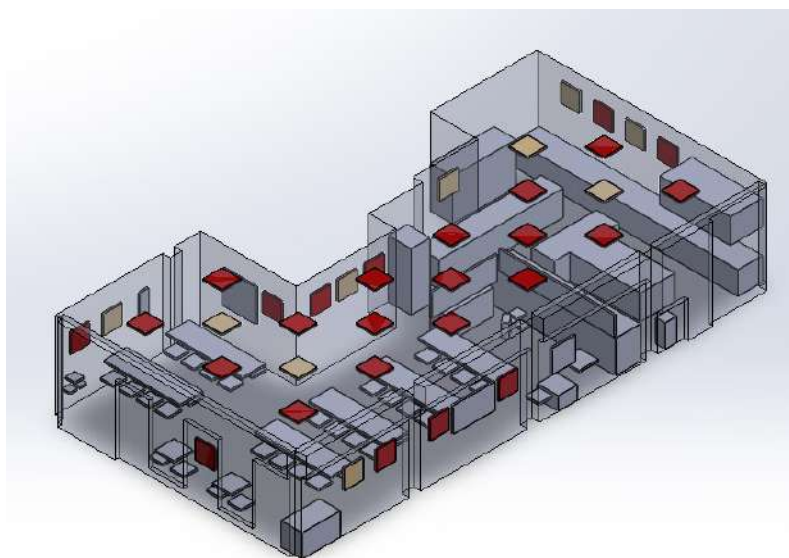


Figura 4.24: Representação da localização dos 27 painéis Kino Soft e 10 painéis de caixas de ovos.

4. Solução n.º 4

Por último, realizou-se um estudo em que não são aplicadas soluções de atenuação de ruído e apenas se altera a direção das mesas de refeição. Achou-se fundamental perceber se a mudança da direção das mesas tem algum impacto na atenuação de ruído. Na figura 4.25 encontra-se representado o modelo 3D deste caso.

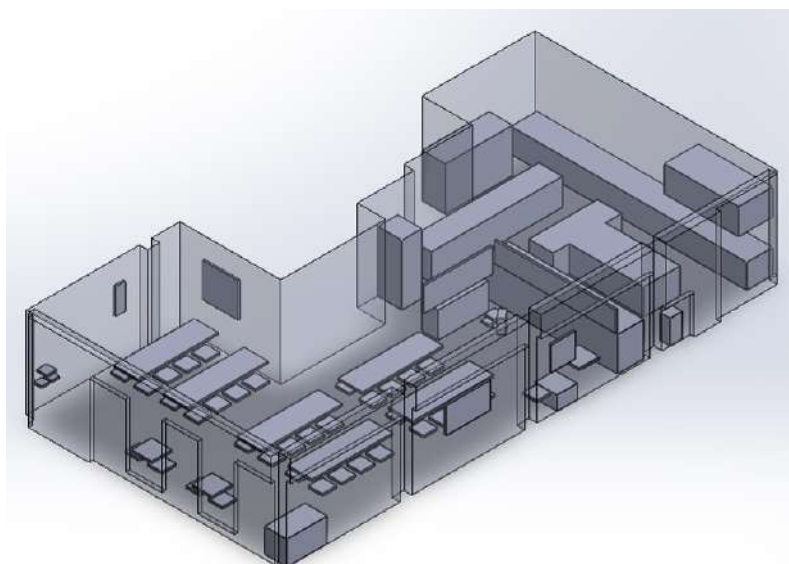


Figura 4.25: Representação do modelo 3D em que a direção das mesas foi alterada.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

5.1 Inquérito para caracterização subjetiva da percepção ao ruído

Obtiveram-se quatro respostas ao inquérito, uma vez que, apenas quatro funcionários se encontravam a trabalhar no estabelecimento na altura da resposta ao questionário. O grupo de estudo era na totalidade do sexo feminino. Os dados adquiridos podem ser observados nos seguintes gráficos.

Relativamente à primeira questão, observou-se que há uma funcionária em cada um dos grupos etários com intervalos de 10 anos, desde os 31 até aos 70 anos, mostrando uma elevada heterogeneidade de idades.

Em relação à segunda questão, verificou-se (figura 5.1) que três das quatro funcionárias avaliaram com um nível 4 ("muito sensível") ao nível de sensibilidade nas horas de maior ruído, ou seja, nas horas em que está presente um maior número de pessoas. A quarta funcionária avaliou com um nível 2 ("ligeiramente sensível") e constata-se que é a funcionária que se insere na faixa etária mais nova (entre os 31 e 40 anos).

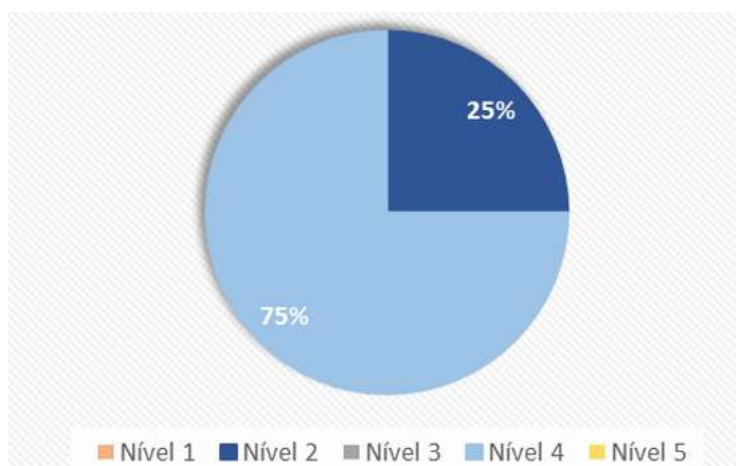


Figura 5.1: Respostas à 2.ª questão: "Qual é a sua sensibilidade ao ruído nas horas que apresentem um maior número de pessoas presentes no restaurante, ou seja, nas horas de maior ruído?".

No gráfico da figura 5.2, verifica-se que entre as 9h00 e as 12h00, houve uma uniformidade de respostas no grupo em estudo, em que a avaliação foi o nível 1 ("absolutamente nada desconfortável") em relação ao nível de incomodidade. Para além disso, observou-se que entre as 12h00 e as 15h00 são as horas em que o nível de incomodidade é maior, ou seja, é o intervalo de tempo em que o ruído e o desconforto são maiores. Após as 15h00, o desconforto ao ruído não foi dado como algo preocupante, tendo o maior nível um valor de 3 ("Moderadamente desconfortável").

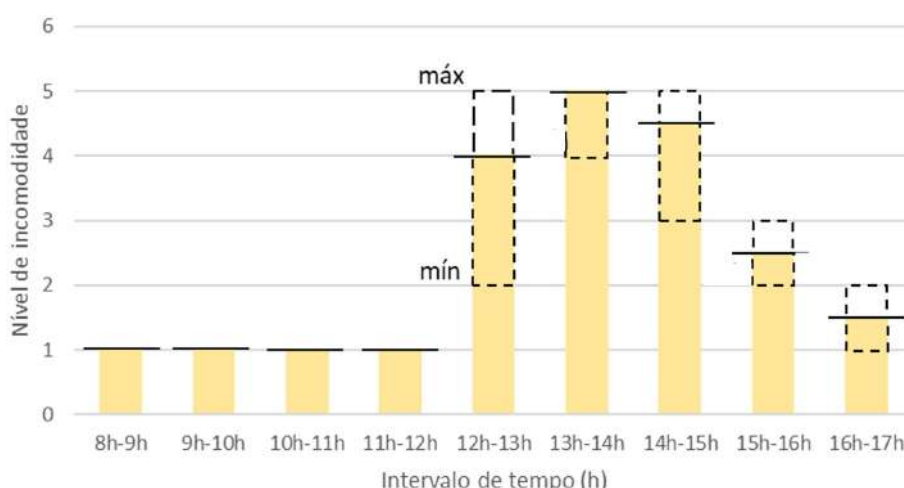


Figura 5.2: Respostas à 3.^a questão: "Considerando o seu horário de trabalho, indique para cada hora, o valor entre 1 e 5, que represente o desconforto relativamente ao ruído presente no restaurante".

Relativamente à quarta pergunta, todas as fontes sonoras descritas para resposta tiveram uma elevada contribuição para o nível de incomodidade, segundo as funcionárias da Casa do Pessoal. No entanto, a "conversa entre pessoas" foi a fonte de ruído avaliada como a fonte sonora que mais perturba nas horas de maior ruído, como se pode observar na figura 5.3. Foi a fonte sonora que teve o maior número de votações (4), como fonte de grande incómodo.

5.1. INQUÉRITO PARA CARACTERIZAÇÃO SUBJETIVA DA PERCEÇÃO AO RUÍDO

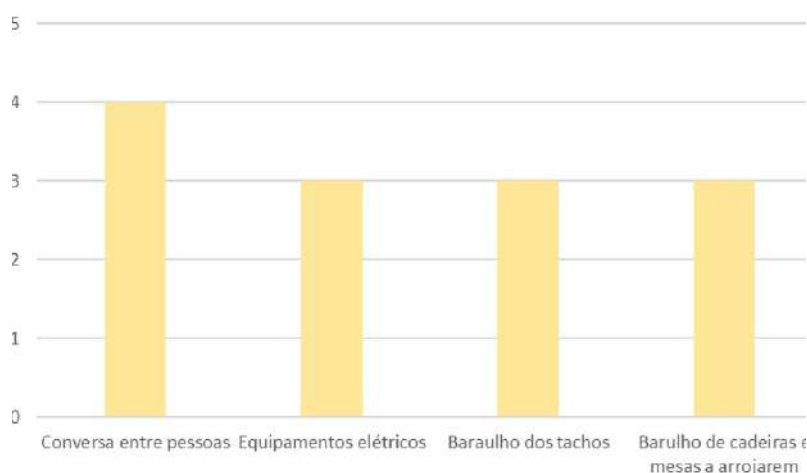


Figura 5.3: Respostas à 4.^a questão: "Na sua percepção, selecione a fonte de ruído que mais o/a perturba na hora de maior incomodidade".

Na figura 5.4 observa-se que foi atribuído maioritariamente, o nível 4 ("muito incomodativo") às fontes sonoras referidas na questão anterior e ainda um nível 5 ("extremamente incomodativo"). A funcionária pertencente à faixa etária entre os 31 e os 40 anos atribuiu um nível 3 ("Moderadamente incomodativo"). Deste modo, observa-se que realmente há diferentes percepções auditivas, dependendo das faixas etárias em que os indivíduos pertencem.

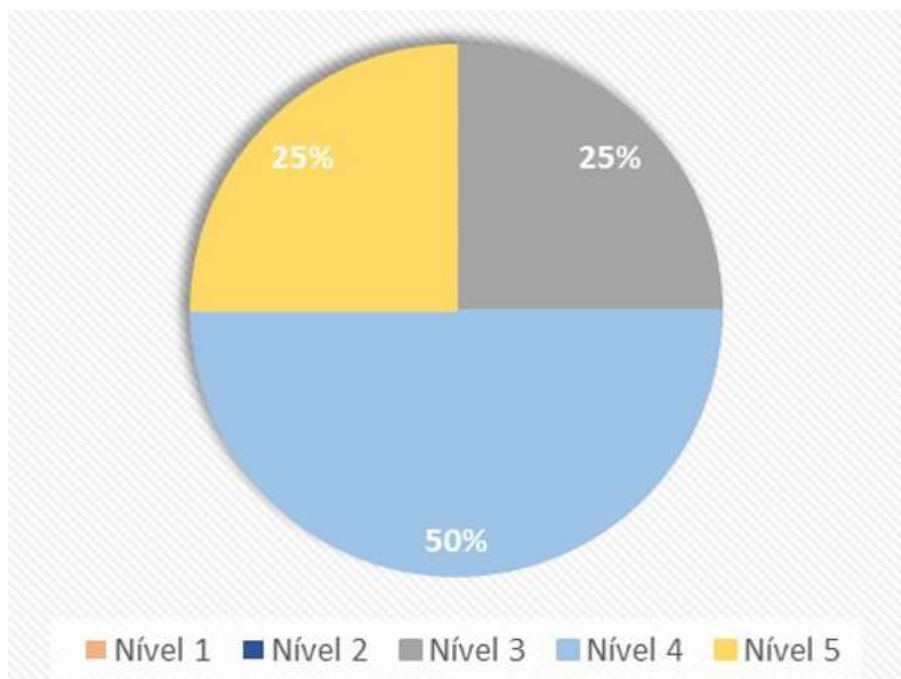


Figura 5.4: Respostas à 5.^a questão: "Relativamente à fonte de ruído mencionada anteriormente, qual é a sua incomodidade?".

Na penúltima pergunta, observa-se (figura 5.5) que metade das funcionárias atribuiu um nível 3 ("moderadamente sensível") de sensibilidade relativamente à mudança súbita

de estado de silêncio para ruído intenso. As restantes votaram num nível 4 ("muito sensível") a esta mudança abrupta.

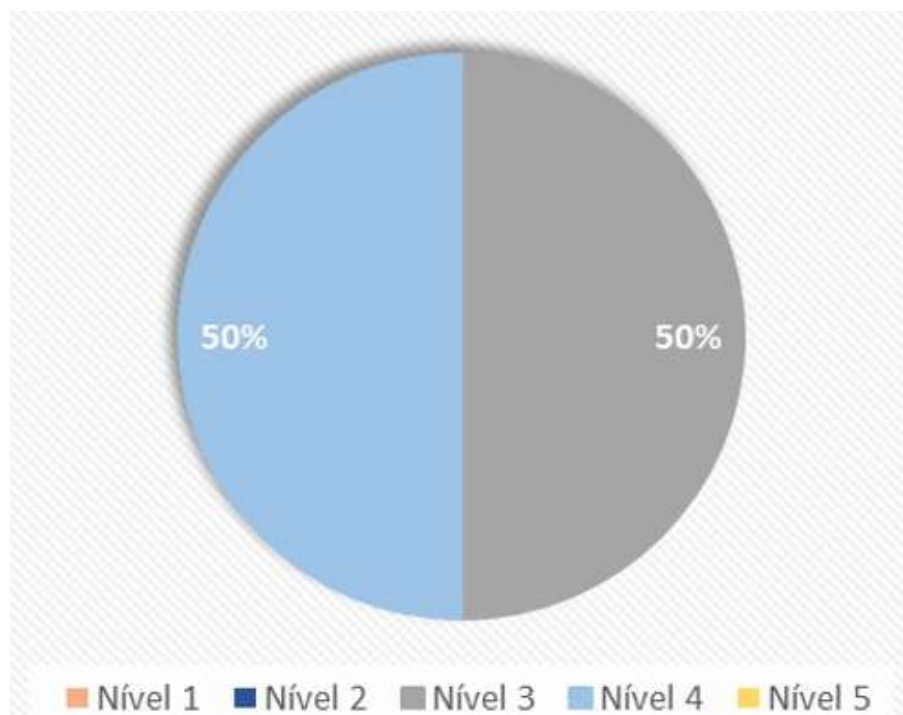


Figura 5.5: Respostas à 6.^a questão: "Qual é a sua sensibilidade para a mudança súbita de estado de silêncio para ruído intenso?".

Relativamente à última e sétima questão, questionou-se os efeitos derivados de um nível de ruído muito elevado. Uma funcionária (pertencente à faixa etária entre os 31 e 40 anos) afirmou que o barulho elevado não é algo que afete muito, tanto a nível físico como psicológico. As restantes funcionárias mencionaram variados efeitos como "cabeça baralhada", "sensibilidade aos ruídos fora da área de trabalho", "dor de cabeça" e ainda "stress e desconforto".

Através das respostas obtidas, observou-se que realmente, a perceção varia de indivíduo para indivíduo, dependendo da idade, estado de saúde, entre outros. Para além disso, pôde destacar-se quais são as horas de maior ruído (entre as 12h e as 15h).

5.2 Tempo de reverberação

Como foi referido anteriormente, realizaram-se duas medições em duas posições diferentes. De seguida, serão apresentadas as tabelas com os dados obtidos e respetiva análise. É de notar que o tratamento de resultados foi realizado através do Excel.

Para servir de exemplo, na figura 5.6 observa-se o gráfico obtido do nível de pressão sonora em tempo real em função do tempo relativo. Este gráfico refere-se à medição 2 da posição 1 e na emissão de ruído cor de rosa aleatório na banda de oitava centrada na frequência de 500 Hz. Através das funcionalidades do *Excel*, adquiriu-se a linha de

tendência com declive negativo do decaimento ($m = -14,881$ dB/s) e, ainda, os valores -5 dB e -35 dB abaixo do nível de pressão sonora máximo (91,6 dB), 86,6 dB e 56,6 dB. Deste modo, através da reta obtida, alcançaram-se os tempo relativos destes dois pontos, onde se adquiriu T_{30} , 2,015 s, que se multiplicou por 2, alcançando T_{60} , 4,03 s. Os restantes gráficos poderão ser observados nos anexos A.4 e A.5. Este processo repetiu-se para cada situação.

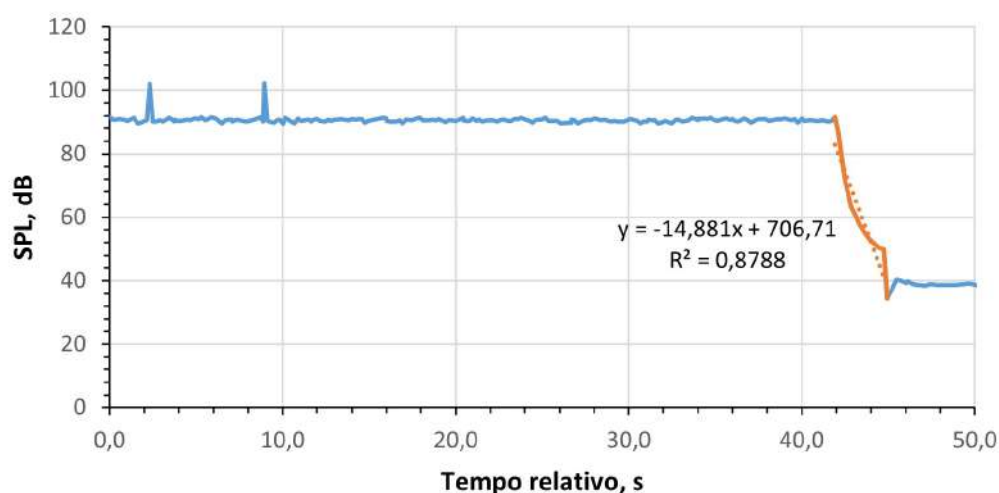


Figura 5.6: Gráfico SPL vs tempo relativo obtido na medição 2, posição 1 e 500 Hz.

Na tabela 5.1 observam-se os valores para cada medição e ainda a média aritmética obtida para o tempo de reverberação na posição 1 e 2, respetivamente. Os valores são todos muito próximos uns dos outros, demonstrando, então, que há uma grande homogeneidade no campo sonoro.

Tabela 5.1: Resultados do tempo de reverberação na posição 1, segundo o método do ruído interrompido.

Banda de frequências (Hz)	500	1000	2000
$T_{\text{medição1,posição1}}$ (s)	3,81	3,83	3,62
$T_{\text{medição2,posição1}}$ (s)	4,03	3,54	3,36
$T_{\text{médio,medição1+2,posição1}}$ (s)	3,92	3,69	3,49
$T_{\text{medição1,posição2}}$ (s)	4,24	3,81	4,05
$T_{\text{medição2,posição2}}$ (s)	3,91	3,84	3,99
$T_{\text{médio,medição1+2,posição2}}$ (s)	4,07	3,83	4,02

Na tabela 5.2 encontram-se os valores das médias aritméticas da posição 1 e 2, para cada gama de frequências. Observou-se que para a frequência de 1000 Hz e 2000 Hz os valores são iguais, no entanto o valor da gama de 500 Hz não é muito distante dos restantes. Na mesma tabela encontra-se o valor que corresponde à média aritmética das

bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, sendo este o valor final do tempo de reverberação para o método do ruído interrompido.

Tabela 5.2: Resultados do tempo de reverberação médio da posição 1 e 2 para cada frequência e média aritmética final do T_{60} segundo o método do ruído interrompido.

Banda de frequências (Hz)	500	1000	2000
$T_{\text{médio, posição 1+2}}$ (s)	4,00	3,76	3,76
$T_{\text{médio}}$ (s)	3,84		

Relativamente à tabela 5.3 encontram-se os valores obtidos para as medições 1 e 2 para as posições 1 e 2, respetivamente, tal como o valor correspondente às médias aritméticas dos valores anteriormente referidos. Observou-se que a média para a posição 1 e 2 é semelhante. Na última linha da tabela observa-se a média aritmética dos valores anteriormente referidos, que corresponde ao valor final para o método do rebentamento do balão.

Tabela 5.3: Resultados dos tempo de reverberação obtidos na posição 1 e 2 e média aritmética final do T_{60} , segundo o método do rebentamento do balão.

$T_{\text{medição1, posição1}}$ (s)	3,28
$T_{\text{medição2, posição1}}$ (s)	3,78
$T_{\text{médio, medição1+2, posição1}}$ (s)	3,53
$T_{\text{medição1, posição2}}$ (s)	3,65
$T_{\text{medição2, posição2}}$ (s)	3,32
$T_{\text{médio, medição1+2, posição2}}$ (s)	3,49
$T_{\text{médio, posição1+2}}$ (s)	3,51

O facto de haver discrepâncias entre os valores nas mesmas posições, pode dever-se ao facto da coluna não ser omnidirecional e ainda de haver ruído de fundo que pode ter perturbado as medições, como o ruído derivado do vento, aviões e pessoas. Isto pode ser observado pelo fato de as linhas não serem retas. Para além disso, o facto de ter estado mais de um indivíduo a realizar as medições também pode ter perturbado as medições, uma vez que as pessoas também têm capacidade de absorver ondas sonoras.

De seguida, consideraram-se os valores das últimas linhas das tabelas 5.2 e 5.3, com o objetivo de comparar com o valor regulamentar, como se pode observar na figura 5.7.



Figura 5.7: Comparação entre os valores obtidos do T_{60} dos dois métodos e o valor regulamentar

Observou-se que o espaço não se encontra regulamentado a níveis do tempo de reverberação sonora, com valores muito mais elevados do que era suposto, tanto no método do rebentamento do balão como no método do ruído interrompido. Sendo por isso necessário arranjar medidas corretivas a nível acústico para o espaço de restauração, de modo a trazer satisfação aos funcionários e aos clientes.

5.3 Nível de pressão sonora

Na figura 5.8 observa-se o gráfico obtido no *software* durante o horário de trabalho de um dia no mês de maio. Constatou-se que, realmente, entre as 12h e 15h houve grandes perturbações (muitos vales e picos) e ainda se observou que os valores dos picos do nível de pressão sonora são bastante mais elevados em comparação com o restante horário. Apesar de que, após as 15h, também se verificaram alguns picos, mas não tão constantes como no horário de maior ruído. O número de amostras totais gravados pelo sonómetro foram 2910. Deste modo obteve-se o nível de pressão sonora equivalente: 75,9 dB(A). Este valor encontra-se acima do valor limite aceitável definido para restaurantes (tabela 4.4).

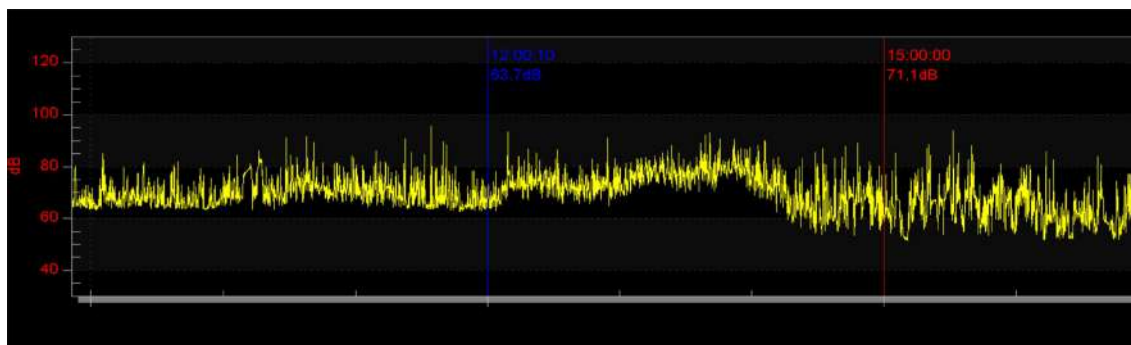


Figura 5.8: Gráfico obtido no *software* SE322, durante um dia de trabalho no mês de maio.

Na tabela 5.4 encontram-se os valores que foram necessários para definir a pressão sonora na coluna, ou seja, na simulação numérica foram utilizados tanto a frequência como a pressão sonora, derivada do SPL correspondente.

Tabela 5.4: Resultados do nível de pressão sonora a 1,7 m e a 1,0 m da coluna.

Frequência (Hz)	250	500	1000	2000
$SPL_{1,725}$ (dB)	65,6	78,5	70,2	85,2
SPL_1 (dB)	70,4	83,3	75	90

Na tabela 5.5 encontram-se os valores medidos nas posições 1 e 2 e estes são os valores que foram comparados com os obtidos na simulação numérica. Observou-se uma maior diferença nos valores obtidos para a frequência de 500 Hz na posição 2, sendo este muito inferior ao valor da posição 1. Enquanto que, nas restantes frequências não houve uma discrepância tão elevada. Isto pode dever-se à presença do acrílico que provoca uma elevada sensibilidade do campo sonoro para uma frequência de 500 Hz. Este pode ter absorvido ondas sonoras ou então servir como bloqueio de passagem para as ondas.

Tabela 5.5: Resultados do nível de pressão sonora nas posições 1 e 2, a serem comparados com os resultados numéricos.

Frequência (Hz)	250	500	1000	2000
$SPL_{\text{posição1}}$ (dB)	69,8	72,6	64,8	78,9
$SPL_{\text{posição2}}$ (dB)	61,8	41,9	63,4	70,1

5.4 Resposta em frequência

De seguida, apresenta-se a figura 5.9, onde se representa o gráfico obtido, da magnitude em função da frequência, após a Transformada de Fourier ter sido aplicada numa gravação feita no espaço de restauração.

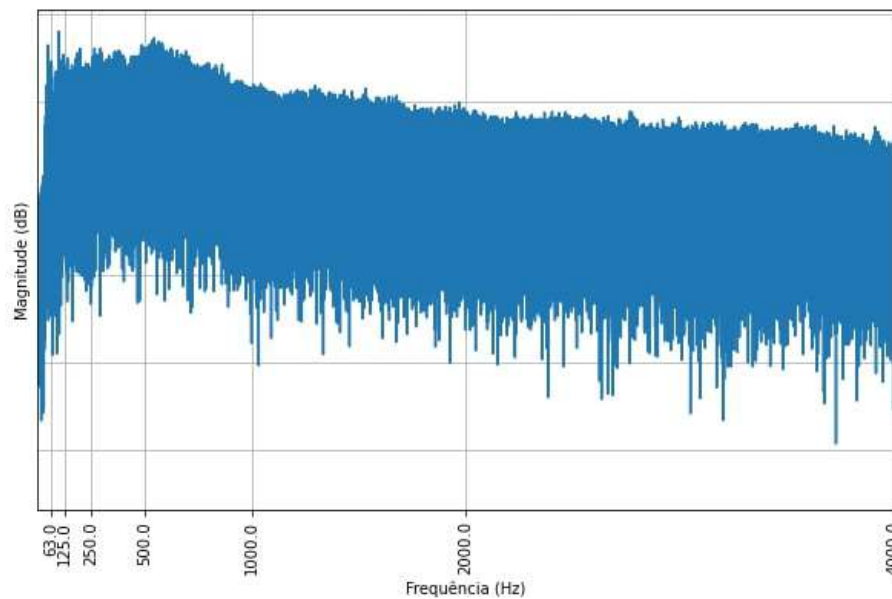


Figura 5.9: Gráfico da resposta em frequência do espaço de restauração em estudo.

Como se pode observar na Figura 5.9, o intervalo de frequências em que se observa um maior valor da magnitude no espaço da Casa do Pessoal são principalmente as baixas e médias (entre 63 Hz e 1000 Hz), no entanto, acima dos 1000 Hz também se verifica uma contribuição razoável para o ruído. Destaca-se que ocorreu uma diminuição da magnitude com o aumento da frequência a partir dos 1000 Hz, o que significa que a partir desta frequência, não ocorre uma contribuição tão notável. O ideal seria ter uma linha horizontal sem picos e vales de modo que a contribuição das diversas frequências fosse uniforme, uma vez que isto significaria que o espaço de restauração teria as condições necessárias para dar resposta ao ruído. No entanto, isto é a situação ideal e, portanto, irrealista. De modo a aproximar à situação ideal, é necessário a aplicação de soluções para corrigir o ambiente sonoro e impedir a reflexão das ondas sonoras.

Deste modo, percebe-se que as soluções a serem aplicadas devem focar-se, principalmente, no intervalo entre os 63 e os 1000 Hz, o que coincide, grande parte, no intervalo de frequências a que o discurso humano pertence ([170,4000] Hz), o que é coerente com o facto de a gravação ter sido feita na hora onde havia o maior número de pessoas a conversarem [19].

RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo apresentam-se os resultados de cada simulação realizada, incluindo as situações sem e com soluções aplicadas. Para além disso, compara-se os valores medidos com os valores obtidos via numericamente.

6.1 Excitação do campo sonoro sem soluções de atenuação ao ruído aplicadas

Na tabela 6.1 encontram-se os valores obtidos do SPL através das simulações numéricas nas posições 1 e 2. Verificou-se que os valores da posição 1 aproximaram-se bastante dos valores medidos, enquanto que, na posição 2 distanciaram-se mais, principalmente na frequência de 500 Hz. Isto pode dever-se ao facto dos coeficientes de absorção do acrílico não serem os mais aproximados à realidade. Não se dá peso aos coeficientes de absorção dos restantes objetos pois estes não interferem com as medições da posição 2.

Tabela 6.1: Resultados do nível de pressão sonora obtidos por simulações numéricas nas posições 1 e 2.

Frequência (Hz)	250	500	1000	2000
SPL _{posição1} (dB)	70,2	69,1	75,5	78,8
SPL _{posição2} (dB)	67,1	59,4	65,4	89,1

Nas figuras 6.1 e 6.2 observa-se a comparação entre os valores obtidos numericamente e experimentalmente, sem soluções de atenuação ao ruído aplicadas e confirma-se que na posição 1 a diferença entre estes é muito menor. Na posição 2 os valores diferem de forma muito mais significativa.

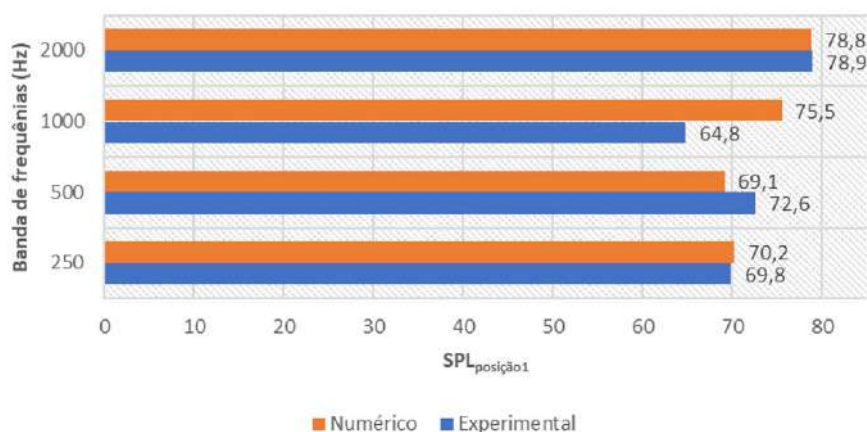


Figura 6.1: Comparação dos valores experimentais e numéricos do SPL na posição 1 sem solução de atenuação de ruído aplicada.

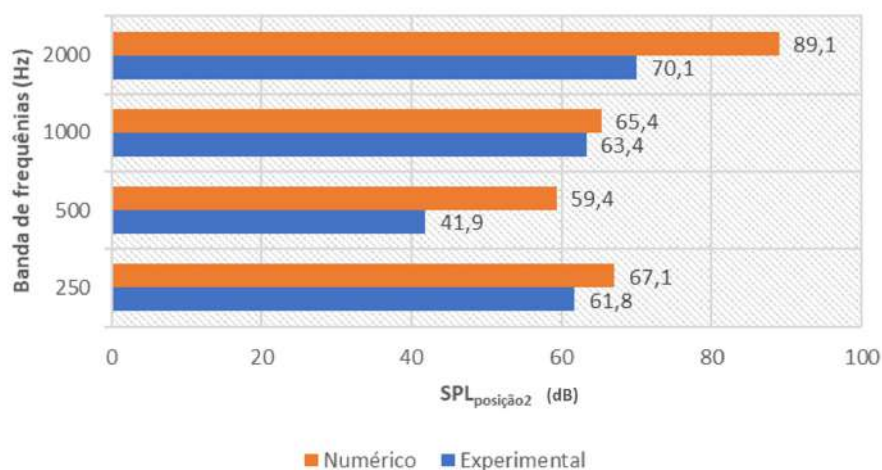


Figura 6.2: Comparação dos valores experimentais e numéricos do SPL na posição 2 sem solução de atenuação de ruído aplicada.

Nas figuras 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6 encontram-se os campos sonoros para as frequências de 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz e ainda 2000 Hz, respetivamente no caso em que não foram aplicadas medidas corretivas. No anexo A.6 podem ser consultados os campos sonoros obtidos nas posições 1 e 2. Constatou-se que, à medida que a frequência progrediu, ocorreu uma diminuição do comprimento de onda. Para além disso, afirma-se que apenas a partir dos 500 Hz começou a haver uma maior densidade de locais com valores elevados de SPL na zona da cozinha. Observou-se ainda que há uma maior densidade de locais com SPL alto nas arestas, tetos e junto da mobília, exceto na frequência de 2000 Hz. Por último, verificou-se que principalmente nas frequências de 250 Hz e 500 Hz é visível zonas onde o nível de pressão sonora é mais reduzido na zona da cozinha e que os valores mais elevados apresentam-se sempre na zona das mesas em todas as frequências.

6.1. EXCITAÇÃO DO CAMPO SONORO SEM SOLUÇÕES DE ATENUAÇÃO AO RUÍDO APLICADAS

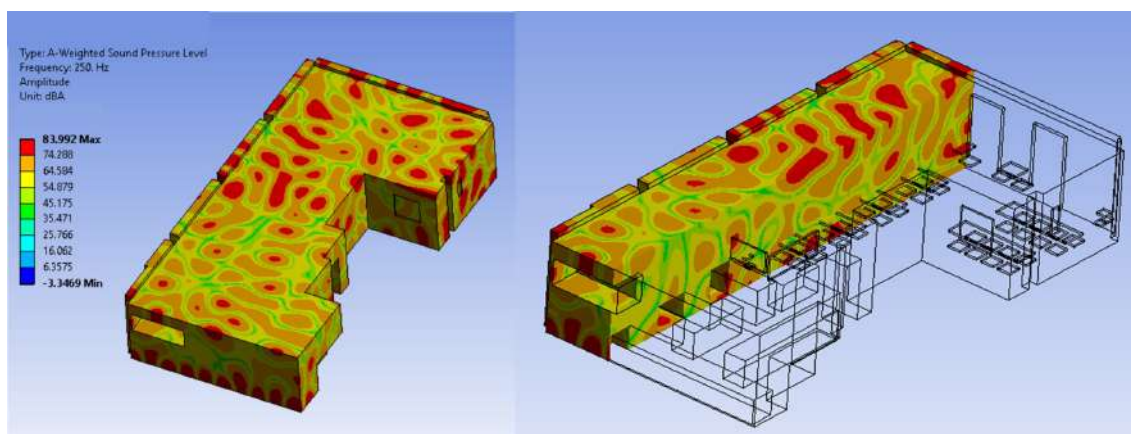


Figura 6.3: Campo sonoro obtido no *software Ansys* para uma frequência de 250 Hz.

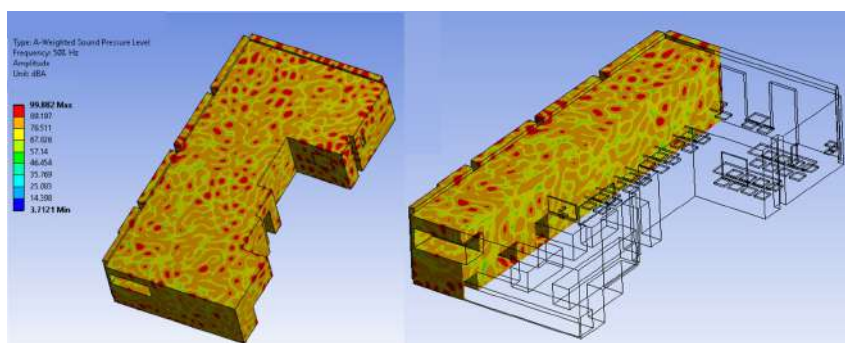


Figura 6.4: Campo sonoro obtido no *software Ansys* para uma frequência de 500 Hz.

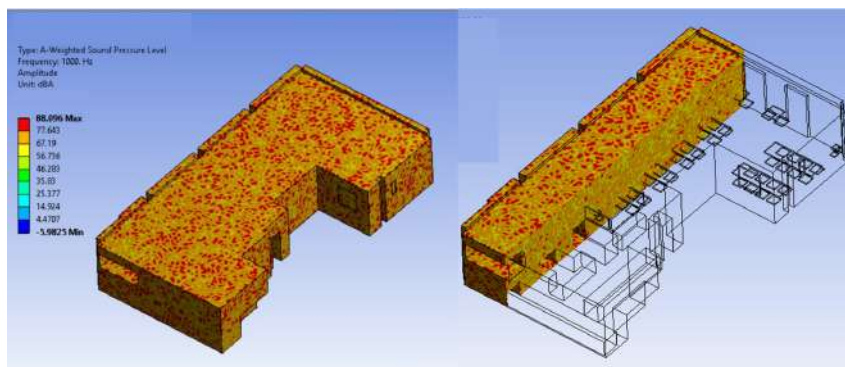


Figura 6.5: Campo sonoro obtido no *software Ansys* para uma frequência de 1000 Hz.

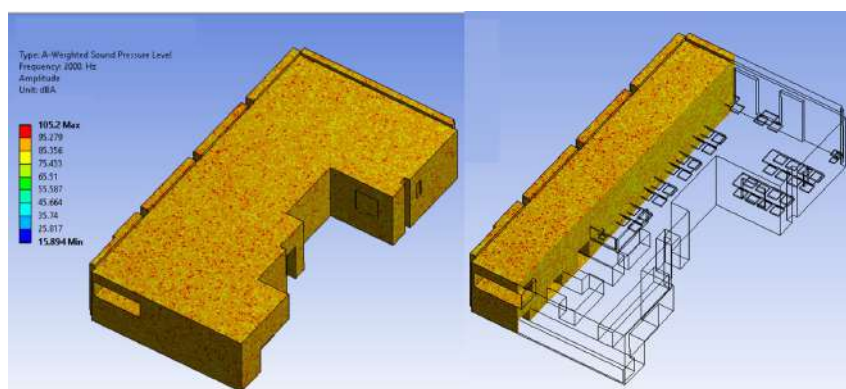


Figura 6.6: Campo sonoro obtido no *software Ansys* para uma frequência de 2000 Hz.

6.2 Solução n.º 1

Na tabela 6.2 encontram-se os valores obtidos do nível de pressão sonora após a aplicação da espuma acústica Mocka BT nas arestas do espaço. Observou-se que a aplicação de 8 unidades não seria suficiente, uma vez que grande parte dos valores foram muito elevados, tanto na posição 1 como na posição 2 e, segundo a tabela 4.4, estes valores não respeitavam o valor limite aceitável do SPL (65 dB(A)). Aumentou-se o número de unidades até se alcançar o melhor resultado possível e sem ter um custo demasiado alto. Com a colocação das 32 unidades, apenas um valor não respeitou o intervalo aceitável, sendo esta, então, a melhor proposta a ser considerada da solução n.º1. Não se realizaram mais simulações numéricas pois o custo da última proposta já era muito elevado, não sendo portanto, viável a colocação de mais unidades no modelo numérico. As propostas foram apresentadas na secção 4.2.

Tabela 6.2: Resultados do nível de pressão sonora obtidos nas posições 1 e 2, para as quatro propostas da solução n.º 1.

Proposta	Frequência (Hz)	250	500	1000	2000
1	SPL _{posição1} (dB)	50,7	77,3	64,1	78,2
	SPL _{posição2} (dB)	50,9	71,2	70,9	81,8
2	SPL _{posição1} (dB)	44,4	74,9	64,1	79,4
	SPL _{posição2} (dB)	41,2	61,9	65,9	76,1
3	SPL _{posição1} (dB)	43,7	69,9	56,2	65,0
	SPL _{posição2} (dB)	39,5	51,1	67,7	71,4
4	SPL _{posição1} (dB)	45,4	71,4	54,5	62,5
	SPL _{posição2} (dB)	32,8	61,9	57,4	59,9

Pode observar-se nas figuras 6.7 e 6.8, a comparação entre os valores obtidos na secção anterior (6.1) e os valores obtidos com a solução proposta aplicada no modelo.

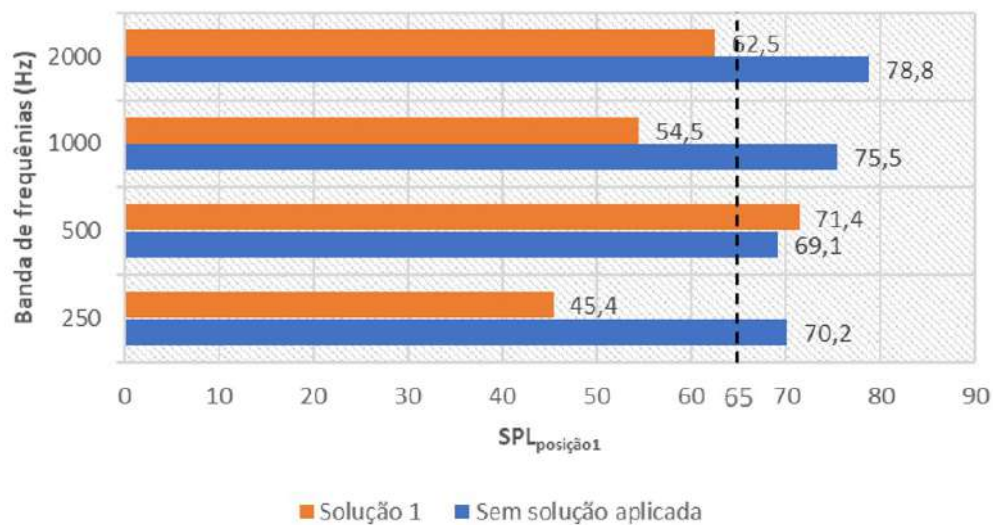


Figura 6.7: Comparação entre os valores obtidos do SPL na posição 1, com e sem solução de atenuação n.º 1 aplicada.

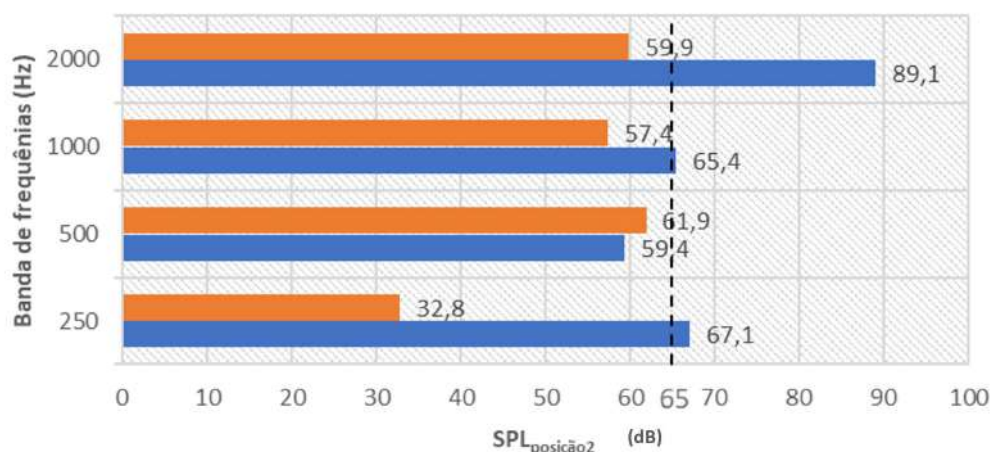


Figura 6.8: Comparação entre os valores obtidos do SPL na posição 2, com e sem solução de atenuação n.º 1 aplicada.

Nas figuras 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12 encontram-se os campos sonoros obtidos após a aplicação das 32 unidades da espuma acústica para as quatro frequências. Observa-se que nos quatro campos sonoros o valor do SPL é máximo junto da coluna, enquanto que, no restante espaço o valor do SPL é mais reduzido. Afirma-se novamente que com o aumento da frequência ocorreu uma diminuição do comprimento de onda. Apenas para 500 Hz relatou-se uma maior área de zonas com o valor do nível de pressão sonora elevando, provando então que para esta frequência a absorção sonora não foi tão eficiente na atenuação ao ruído, o que é comprovado pelos valores obtidos na tabela 6.2. Constata-se ainda que com o aumento da frequência, nos locais com o maior valor de SPL ocorreu uma redução de área, tanto no teto como nas arestas e paredes.

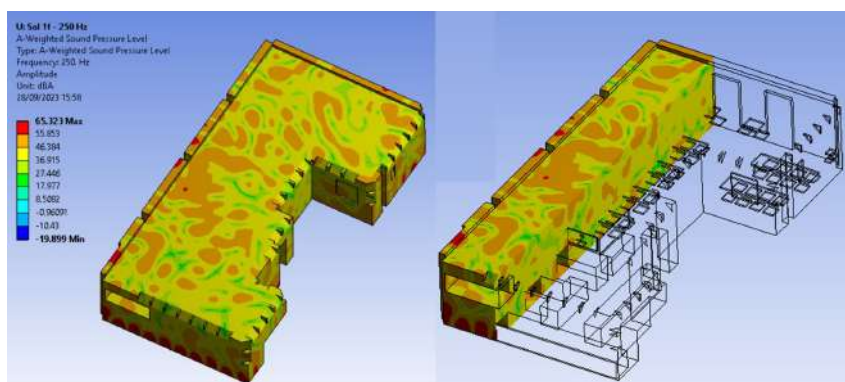


Figura 6.9: Campo sonoro obtido no *software Ansys* com a proposta 4 da solução 1 aplicada para 250 Hz.

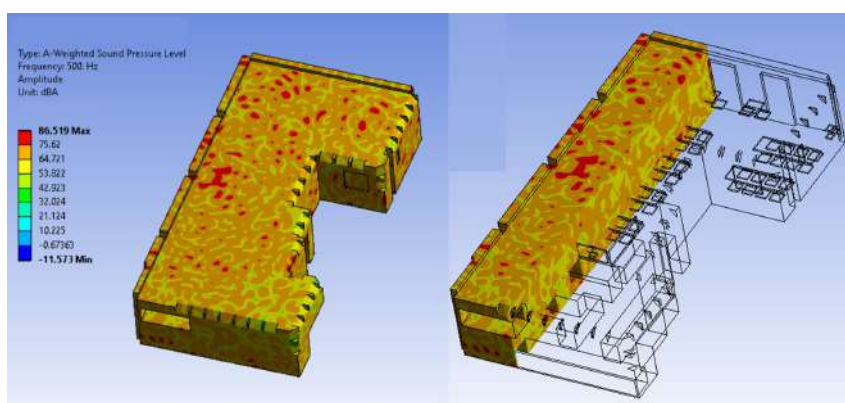


Figura 6.10: Campo sonoro obtido no *software Ansys* com a proposta 4 da solução 1 aplicada para 500 Hz.

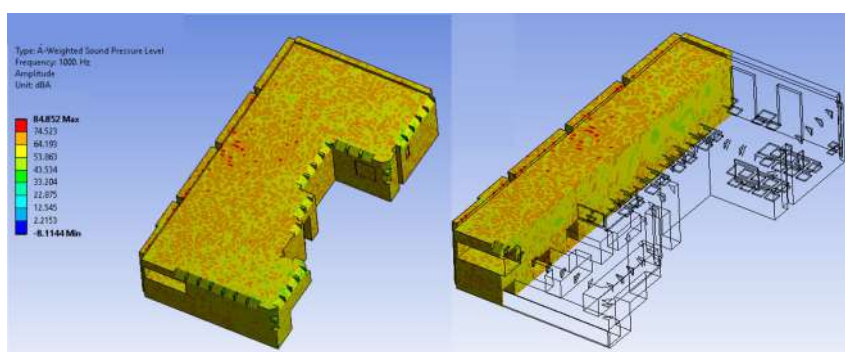


Figura 6.11: Campo sonoro obtido no *software Ansys* com a proposta 4 da solução 1 aplicada para 1000 Hz.

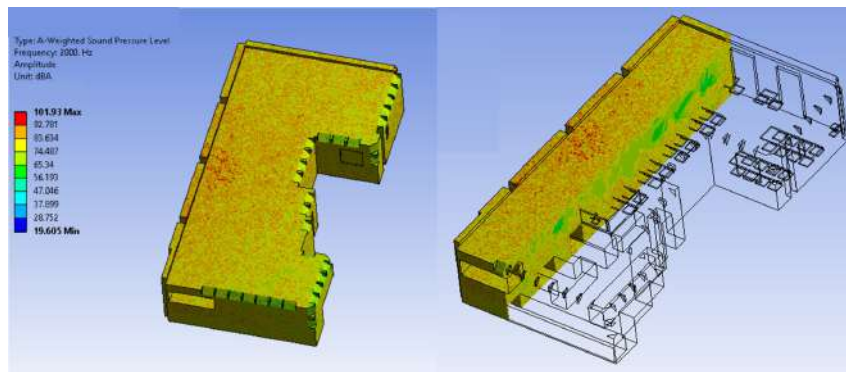


Figura 6.12: Campo sonoro obtido no *software Ansys* com a proposta 4 da solução 1 aplicada para 2000 Hz.

6.3 Solução n.º 2

Na tabela 6.3 encontra-se os valores obtidos para a primeira, segunda, terceira e quarta propostas da solução n.º 2. Observou-se que na primeira, segunda e terceira propostas o custo seria muito elevado para os resultados obtidos não serem os mais favoráveis, ou seja, o nível de pressão sonora não respeita a tabela 4.4. Portanto, para a quarta proposta focou-se principalmente na colocação dos painéis, uma vez que estes têm coeficientes de absorção elevados. Observou-se que o nível de pressão sonora reduziu consideravelmente tanto na posição 1 como na posição 2 em comparação com os valores da tabela 6.1, com exceção da frequência de 2000 Hz. Para 2000 Hz não se constatou uma redução do nível de pressão sonora significativa para nenhuma das propostas desta solução. Concluiu-se que a quarta proposta seria a mais adequada para ser aplicada, tendo como única desvantagem a ineficiência dos painéis para 2000 Hz. Nas restantes frequências os valores respeitam a tabela 4.4. As propostas foram apresentadas na secção 4.2.

Tabela 6.3: Resultados do nível de pressão sonora obtidos nas posições 1 e 2, para as quatro propostas da solução n.º 2.

Proposta	Frequência (Hz)	250	500	1000	2000
1	SPL _{posição1}	51,3	75,8	59,7	74,1
	SPL _{posição2}	52,2	67,9	60,7	79,4
2	SPL _{posição1}	50,5	69,4	62,7	80,5
	SPL _{posição2}	44,3	62,0	58,0	80,5
3	SPL _{posição1}	50,3	68,4	62,3	73,8
	SPL _{posição2}	34,8	61,6	60,5	76,2
4	SPL _{posição1}	47,8	64,3	48,9	82,2
	SPL _{posição2}	36,5	56,1	59,9	77,3

Pode observar-se nas figuras 6.13 e 6.14, a comparação entre os valores obtidos na secção 6.1 e os valores obtidos com a solução proposta aplicada no modelo.

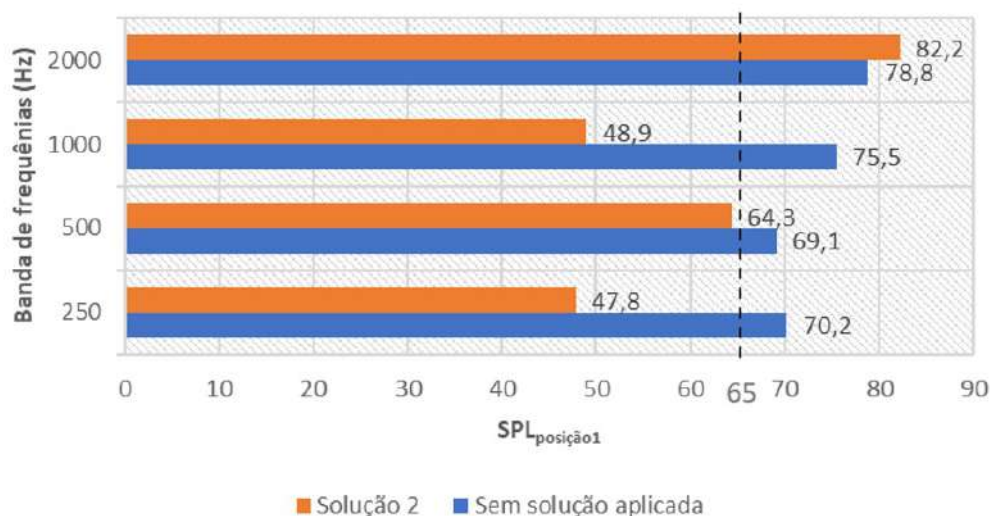


Figura 6.13: Comparação entre os valores obtidos do SPL na posição 1, com e sem solução de atenuação n.º 2 aplicada.

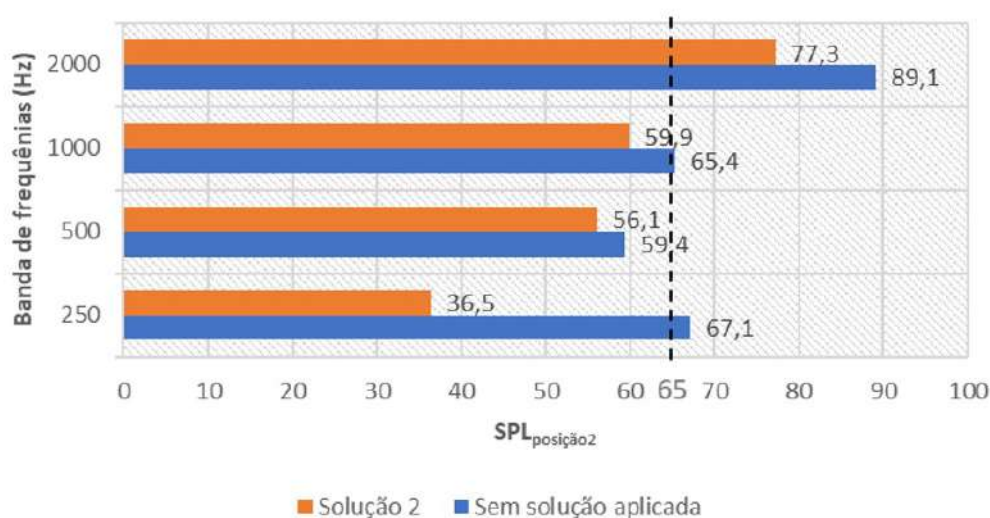


Figura 6.14: Comparação entre os valores obtidos do SPL na posição 2, com e sem solução de atenuação n.º 2 aplicada.

Relativamente aos campos sonoros obtidos após a aplicação da quarta proposta, estes podem ser observados nas figuras 6.15, 6.16, 6.17 e 6.18. Afirma-se que para esta solução também ocorre junto da coluna uma zona com um maior nível de pressão sonora, principalmente na frequência de 500 Hz. Observa-se ainda que para 250 Hz ocorreu uma maior absorção sonora, uma vez que há uma maior presença de zonas com cores verdes e amarelas que correspondem a valores mais baixos de SPL. É de referir ainda que com o aumento da frequência ocorreu uma diminuição do comprimento de onda.

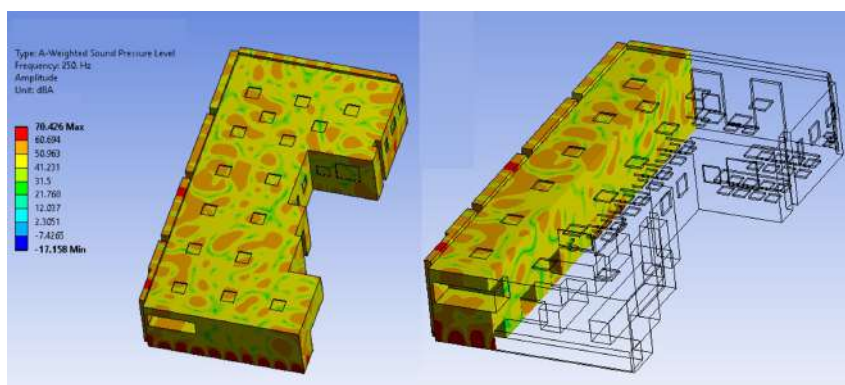


Figura 6.15: Campo sonoro obtido no *software Ansys* com a proposta 4 da solução 2 aplicada para 250 Hz.

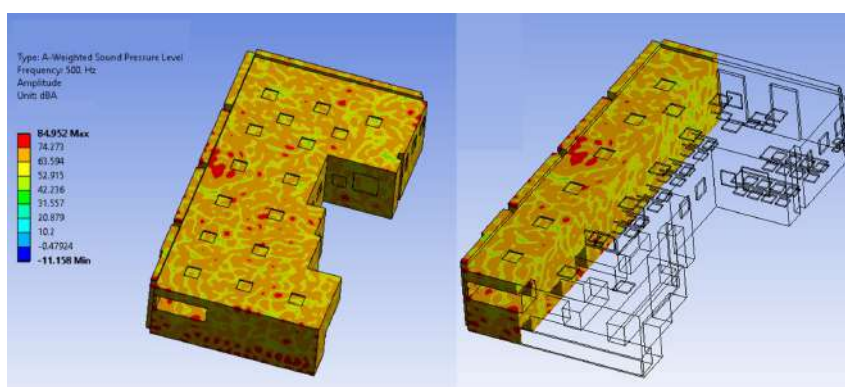


Figura 6.16: Campo sonoro obtido no *software Ansys* com a proposta 4 da solução 2 aplicada para 500 Hz.

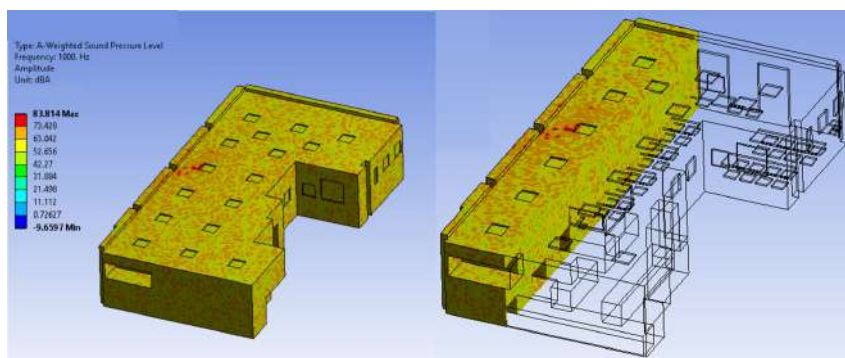


Figura 6.17: Campo sonoro obtido no *software Ansys* com a proposta 4 da solução 2 aplicada para 1000 Hz.

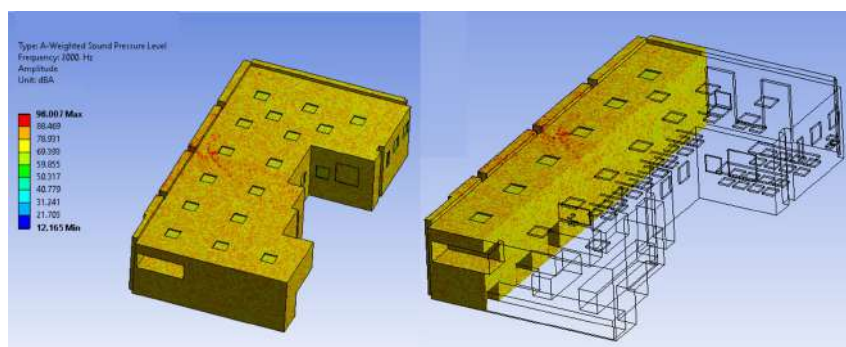


Figura 6.18: Campo sonoro obtido no *software Ansys* com a proposta 4 da solução 2 aplicada para 2000 Hz.

6.4 Solução n.º 3

Relativamente à solução n.º 3, a partir da segunda proposta, inclusive obtiveram-se sempre valores abaixo daqueles definidos na tabela 4.4, com exceção dos valores adquiridos na frequência de 2000 Hz. Afirmar-se então que, apenas para 2000 Hz, as propostas não são tão eficientes na absorção das ondas sonoras. As propostas foram apresentadas na secção 4.2.

Tabela 6.4: Resultados do nível de pressão sonora obtidos nas posições 1 e 2, para as quatro propostas da solução n.º 3.

Proposta	Frequência (Hz)	250	500	1000	2000
1	SPL _{posição1}	56,7	65,2	40,5	78,4
	SPL _{posição2}	50,6	47,9	52,0	78,1
2	SPL _{posição1}	51,9	63,5	43,0	74,3
	SPL _{posição2}	44,9	55,0	57,8	68,5
3	SPL _{posição1}	51,8	63,3	40,9	75,2
	SPL _{posição2}	44,8	57,5	58,0	66,2
4	SPL _{posição1}	51,2	64,2	41,1	75,0
	SPL _{posição2}	40,1	57,6	58,1	65,5

Pode observar-se nas figuras 6.19 e 6.20, a comparação entre os valores obtidos na secção 6.1 e os valores obtidos com a solução proposta aplicada no modelo.

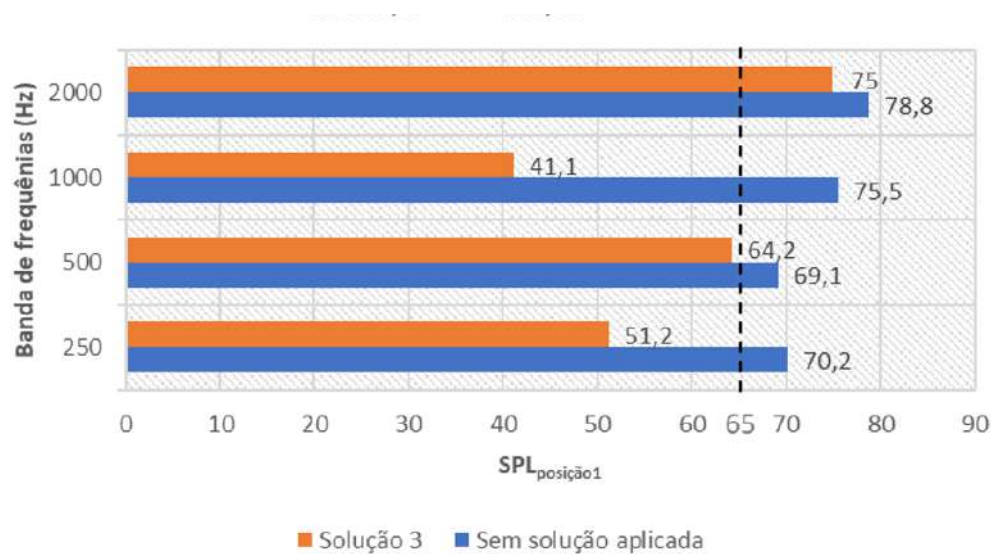


Figura 6.19: Comparação entre os valores obtidos do SPL na posição 1, com e sem solução de atenuação n.º 3 aplicada.

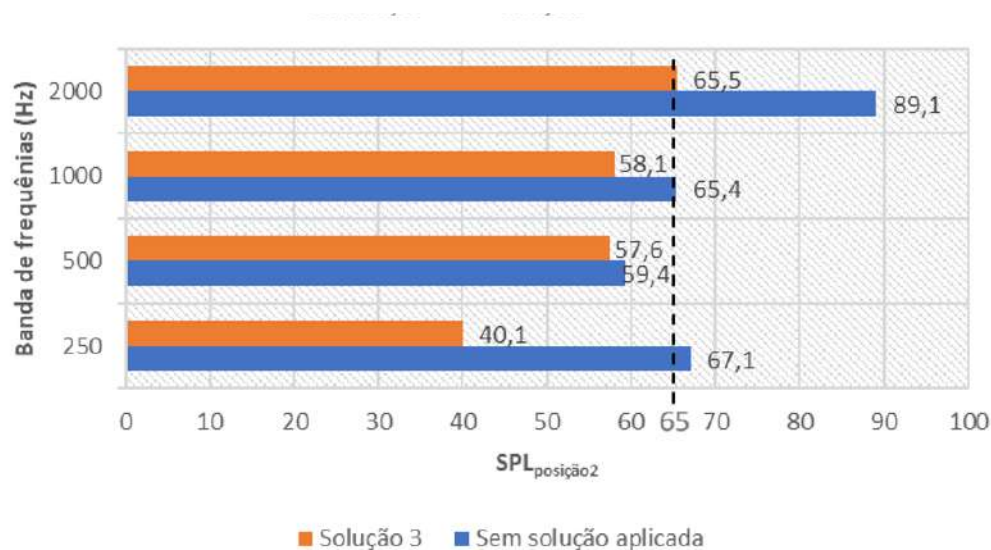


Figura 6.20: Comparação entre os valores obtidos do SPL na posição 2, com e sem solução de atenuação n.º 3 aplicada.

Observa-se que nas figuras 6.21, 6.22, 6.23 e 6.24 há um maior valor do nível de pressão sonora na localização da coluna, enquanto que, no restante modelo os valores do nível de pressão sonora são mais reduzidos. Os níveis da pressão sonora no interior do espaço reduziram significativamente para as frequências de 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, em comparação com os campos sonoros obtidos nas situações em que não foram aplicadas medidas corretivas. Concluiu-se que esta proposta não foi a mais eficiente para a frequência de 2000 Hz, pois na posição 1 da proposta 4 o valor do SPL foi de 75,0 dB, enquanto que na situação sem solução aplicada o valor foi de 78,8 dB. É de referir ainda que com o aumento da frequência ocorreu uma diminuição do comprimento de onda.

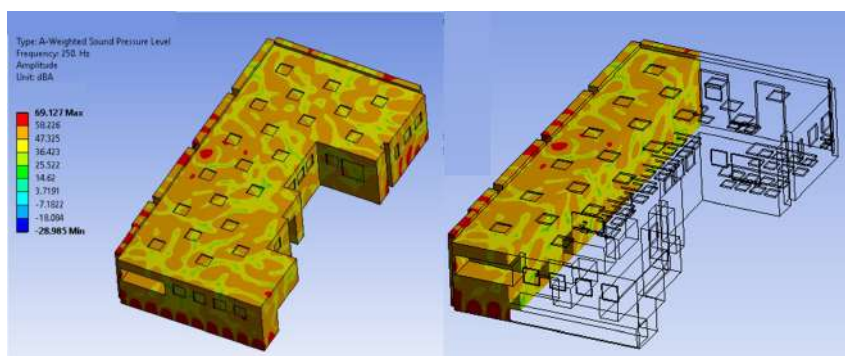


Figura 6.21: Campo sonoro obtido no *software Ansys* com a proposta 4 da solução 3 aplicada para 250 Hz.

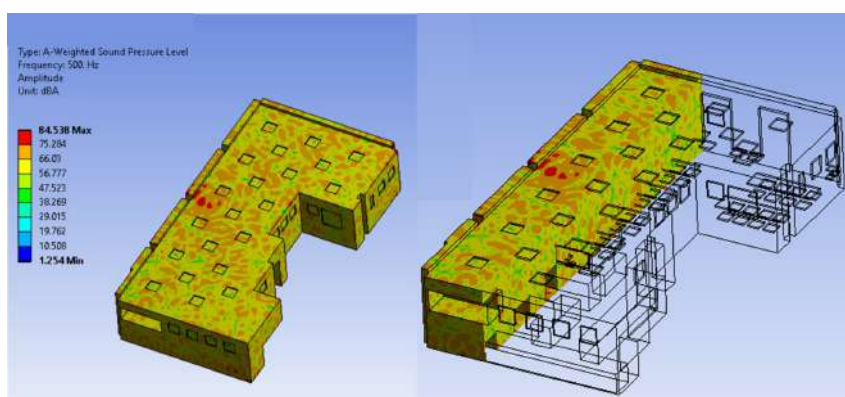


Figura 6.22: Campo sonoro obtido no *software Ansys* com a proposta 4 da solução 3 aplicada para 500 Hz.

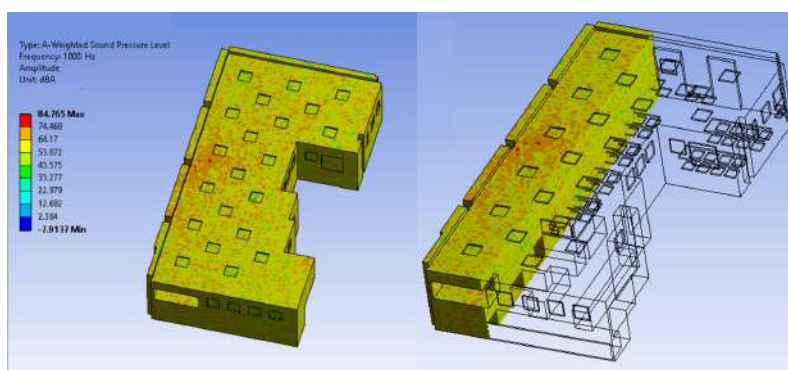


Figura 6.23: Campo sonoro obtido no *software Ansys* com a proposta 4 da solução 3 aplicada para 1000 Hz.

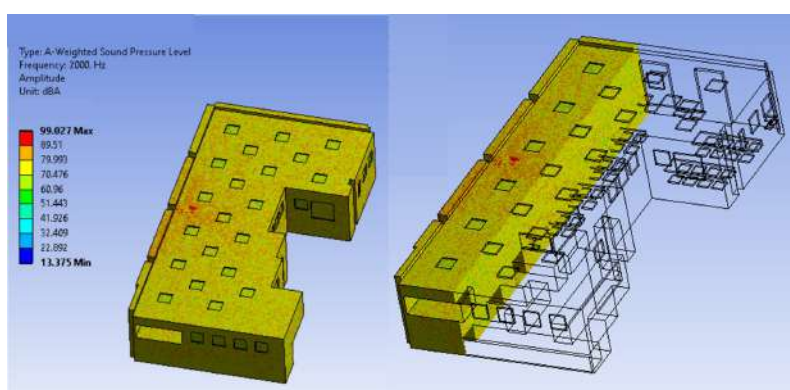


Figura 6.24: Campo sonoro obtido no *software Ansys* com a proposta 4 da solução 3 aplicada para 2000 Hz.

6.5 Solução n.º 4

Na tabela 6.5 encontram-se os valores obtidos nas posições 1 e 2 após a alteração da direção das mesas. Constata-se que apenas houve uma mudança significativa dos valores nas frequências de 250 Hz e 500 Hz. Nas restantes ou os valores permaneceram os mesmos ou houve uma subida ligeira. Ocorreu atenuação de ruído exclusivamente para as baixas frequências, o que não é o pretendido.

Tabela 6.5: Resultados do nível de pressão sonora obtidos nas posições 1 e 2, para a solução n.º 4.

Frequência (Hz)	250	500	1000	2000
SPL _{posição1}	59,4	78,5	75,6	81,4
SPL _{posição2}	31,7	84,9	70,5	88,2

Nas figuras 6.25 a 6.28 encontram-se os campos sonoros obtidos e, observa-se que, de facto, ocorreu uma redução do nível de pressão sonora para as duas primeiras frequências, em comparação com os campos sonoros obtidos nas situações em que não foram aplicadas medidas corretivas. Para as duas últimas frequências, existem vários locais com o valor do nível de pressão sonora mais elevado não demonstrando melhoria do ambiente acústico. É de referir ainda que com o aumento da frequência ocorreu uma diminuição do comprimento de onda.

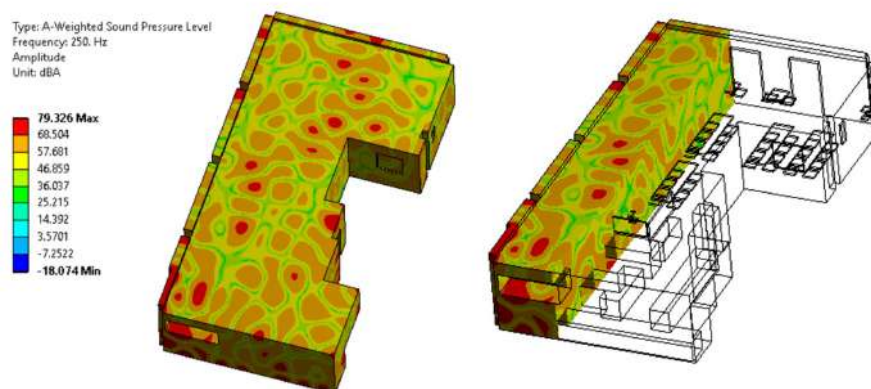


Figura 6.25: Campo sonoro obtido no *software Ansys* com a solução 4 aplicada para 250 Hz.

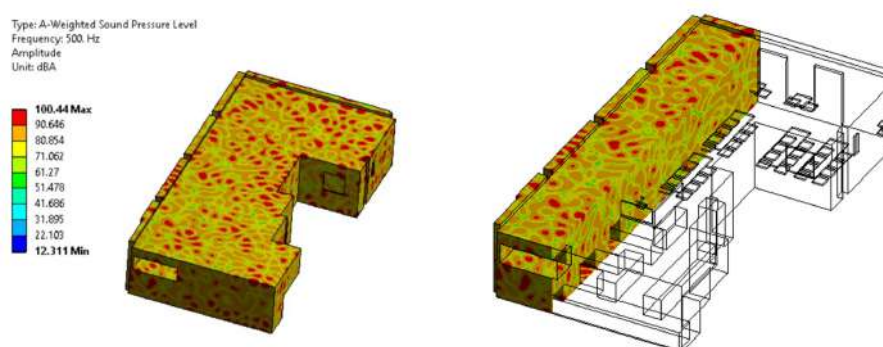


Figura 6.26: Campo sonoro obtido no *software Ansys* com a solução 4 aplicada para 500 Hz.

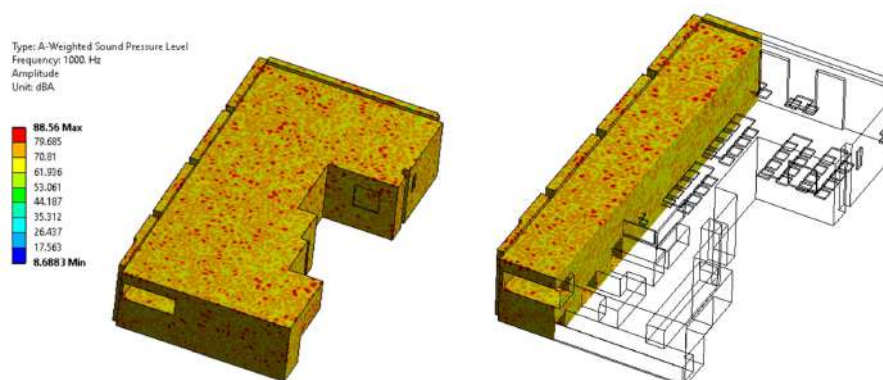


Figura 6.27: Campo sonoro obtido no *software Ansys* com a solução 4 aplicada para 1000 Hz.

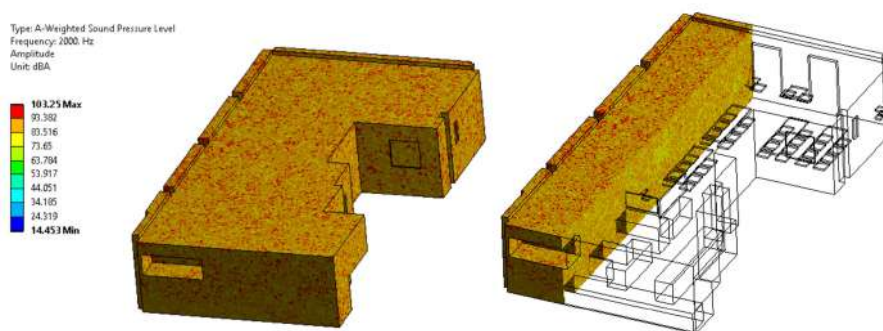


Figura 6.28: Campo sonoro obtido no *software* Ansys com a solução 4 aplicada para 2000 Hz.

6.6 Comparação entre soluções

Primeiramente é importante referir que para cada solução ocorrem oscilações dos valores do nível de pressão sonora: subida e descida dos valores de frequência para frequência e subida e descida dos valores na mesma posição com diferentes propostas aplicadas. Ou seja, por exemplo para a proposta 1 da solução n.º 2, os valores do SPL são superiores nas frequências de 500 Hz e 2000 Hz devido ao valor mais elevado da pressão sonora definido na fonte. É de notar ainda que para a frequência de 250 Hz, na posição 2, o valor do nível de pressão sonora não diminui com o aumento da área da absorção sonora da proposta 4 em comparação com a proposta 3. Isto ocorre devido ao facto de haver uma elevada sensibilidade do espaço às diferentes frequências e posições dos materiais absorventes.

Ao observar-se os valores das tabelas e os campos sonoros obtidos, afirma-se que a melhor solução a ser aplicada ao espaço de restauração é a quarta proposta da solução n.º 1 em que foram colocadas 32 espumas acústicas nas arestas do espaço tanto na zona da cozinha como na zona de refeição. Nesta proposta ocorreu uma absorção sonora eficiente nas duas posições e em todas as frequências, inclusive nos 2000 Hz, enquanto que nas melhores propostas das soluções 2, 3 e 4 nunca ocorreu uma absorção sonora tão eficiente para 2000 Hz. Isto deve-se ao facto de as arestas serem pontos estratégicos para a absorção das ondas sonoras, pois nestes locais existe uma elevada quantidade de energia sonora, como foi explicado anteriormente. As espumas ao serem colocadas nestes locais absorvem uma grande quantidade de energia sonora e, portanto, ocorre uma menor reflexão das ondas sonoras para o interior do espaço.

As propostas com melhores resultados das restantes soluções nem sempre apresentaram bons resultados para 2000 Hz, ou seja, com valores inferiores a 65 dB(A) (tabela 4.4). No entanto, mesmo na proposta mais eficiente (proposta 4 da solução n.º 1) existiu um valor acima dos 65 dB(A), mostrando então que existe, de facto, uma elevada sensibilidade no espaço, que pode depender das posições das espumas e frequências e, portanto, demonstra a dificuldade de arranjar soluções eficientes para todas as frequências.

Apesar de se ter alcançado propostas com um custo mais baixo, como colocação de painéis de caixas de ovos, estes não foram o suficiente para alcançar bons resultados. Foi necessário a colocação de painéis feitos por empresas profissionais na área da acústica. Isto demonstra que, para conseguir um bom melhoramento de condições acústicas, neste caso é necessário um bom investimento.

CONCLUSÃO

7.1 Conclusões

Os espaços de restauração como cantinas de universidades são locais onde é fundamental haver uma boa comunicação, principalmente, entre os funcionários. No entanto, também são locais onde há uma grande afluência de pessoas e pouca quantidade de elementos que tenham a capacidade de absorver ondas sonoras.

Um dos principais objetivos desta dissertação consistia em avaliar o nível de desconforto ao ruído e, ainda, a percepção ao ruído de cada indivíduo. Através da realização de um questionário aos funcionários chegaram-se às seguintes conclusões:

- O horário de trabalho que causa maior incomodidade é entre as 12h00 e as 15h00, sendo as restantes horas menos incomodativas;
- Há percepções diferentes ao ruído entre as funcionárias, principalmente na funcionária pertencente ao grupo etário mais novo, pois esta referiu menor desconforto devido ao nível elevado do ruído;
- A fonte sonora mais incomodativa é a conversa entre pessoas;
- Os efeitos principais consequentes do nível de ruído elevado são dor de cabeça, desconforto e *stress*.

Outro objetivo a ser concretizado foi a avaliação do ambiente sonoro através da obtenção do tempo de reverberação, um parâmetro fundamental na acústica de edifícios. Para tal, foi necessário a leitura de regulamentos presentes na lei portuguesa e concluiu-se que através do Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho, poderia ser feita a análise. Após a medição da reta que representava o decaimento do SPL, obteve-se o T_{60} para as posições 1 e 2 através de dois métodos: o método do ruído interrompido e o método do rebentamento do balão. Com o primeiro método, alcançou-se o valor de 3,84 s e com o segundo, 3,51 s. Através destes valores, obtiveram-se as seguintes conclusões:

- O edifício não satisfaz os limites regulamentares, pois a diferença entre os valores obtidos e 25 % do valor regulamentar foi superior ao valor limite (0,975 s):

- Apesar de serem dois métodos diferentes, chegou-se à mesma conclusão (edifício não satisfaz limites regulamentares);
- É necessário aplicar medidas corretivas no espaço em estudo, de modo a que o tempo de reverberação diminua e para que este fique regulamentado segundo o Decreto-Lei em causa.
- A insatisfação dos colaboradores com o ambiente acústico é justificada com os valores do tempo de reverberação serem muito superiores ao limite regulamentar (0,975 s)

Ainda foi necessário realizar várias medições do nível de pressão sonora e, através destas, chegaram-se às seguintes conclusões:

- Comprovou-se através de medições o horário de trabalho com maior incomodidade referido no inquérito: entre as 12h00 e 15h00;
- O nível de pressão sonora equivalente (75,9 dB(A)) durante o horário de trabalho de um dia foi superior ao valor limite máximo apresentado na tabela 4.4;
- Nas medições realizadas para adquirir valores para simulações numéricas, percebeu-se que para uma frequência de 500 Hz, o acrílico bloqueia a passagem das ondas sonoras, desde a coluna até a posição 2.

Para finalizar a parte experimental da dissertação realizou-se o estudo da resposta em frequência do espaço. Com esta análise percebeu-se que as frequências predominantes do espaço são entre os 63 Hz e 1000 Hz. No entanto, apesar de haver uma diminuição da magnitude das frequências a partir dos 1000 Hz, estas também contribuem para o ruído.

Os estudos numéricos dividiram-se em duas partes: sem e com medidas de atenuação ao ruído aplicadas. Relativamente à parte n.º 1 do estudo numérico concluiu-se que:

- Os valores da posição 1 aproximam-se mais à realidade;
- Devido ao ponto anterior, chegou-se à conclusão de que o facto de os valores não serem mais próximos à realidade, deve-se aos coeficientes de absorção sonora não serem os mais corretos;
- Há uma grande quantidade de energia sonora junto das arestas, teto e mobília, como se pode observar pelos campos sonoros obtidos.

Relativamente às simulações numéricas com medidas corretivas aplicadas concluiu-se que:

- Após a aplicação de quatro soluções com várias propostas de diferentes cenários concluiu-se que a colocação de 32 espumas acústicas junto das arestas seria a opção mais eficiente, apesar de ter um custo muito elevado.

- Devido a ter-se obtido melhores resultados com a aplicação de materiais absorventes nas arestas, é comprovado que a quantidade de energia sonora é elevada nesses locais, pois faz com que haja uma menor reflexão de ondas sonoras para o interior do espaço;
- Mesmo que se aumentasse a área de absorção sonora para cada proposta de uma solução, nem sempre o nível de pressão sonora reduz, devido à sensibilidade do espaço às diferentes frequências e posições dos elementos absorventes;
- Diferentes posições das mesas na zona de refeição não garantiu uma melhoria do ambiente acústico.
- De modo a realizar uma boa melhoria de um ambiente acústico há sempre um custo elevado associado.

Por último, conclui-se que se iniciou um tema exploratório que poderá ter mais pontos de estudo, tanto numericamente como experimentalmente. Os pontos de estudo serão mencionados no capítulo seguintes.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a nível experimental, o estudo dos restantes parâmetros acústicos mencionados no RRAE, como o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea normalizado e ainda a sons de percussão. Deste modo, a caracterização do espaço seria mais rigorosa e mais precisa. Para além disto, sugere-se a medição do tempo de reverberação com os equipamentos adequados, como a coluna omnidirecional e ainda o sonómetro homologado pelo IPQ, com o objetivo de ser feita uma comparação entre os novos valores com os resultados obtidos nesta dissertação. Sugere-se a medição do nível de pressão sonora para cada equipamento, com o objetivo de compreender o impacto de cada um para o campo sonoro e, ainda, a utilização destes valores para a realização das simulações numéricas. Por último, a realização de um questionário aos clientes para além dos funcionários também seria vantajoso, de modo a perceber o quão o ruído afeta estes apesar do pouco tempo de utilização do espaço.

A nível numérico sugere-se primeiramente, o estudo numérico de exemplos simples de modo a garantir uma boa realização e utilização do *software*. Ainda se sugere a realização de simulações com malha mais refinada e a respeitar a regra da malha imposta pelo Ansys, mencionada na secção 2.1.3. Caso não haja poder computacional suficiente, recomenda-se a eliminação de mobília que não tenha impacto nas simulações de modo a simplificar o domínio tridimensional. Para além disso, a simulação numérica com várias fontes sonoras a reproduzir ruído ao mesmo tempo, também é uma proposta para trabalhos futuros. Deste modo, as simulações numéricas aproximam-se às situações de maior ruído no espaço. A modelação 3D do espaço a incluir o teto falso e a caixa de ar entre este e a camada de betão, é algo a considerar também, uma vez que, as caixas de ar também contribuem para

a absorção das ondas sonoras. Ainda se recomenda o aumento do intervalo de frequências das simulações a serem realizadas, de modo a compreender de forma mais pormenorizada o comportamento do campo sonoro. Para além disso, sugere-se o estudo da junção de painéis Kino Soft e espumas acústicas Mocka BT para perceber, se neste caso ocorre uma absorção das ondas sonoras eficiente em todas as frequências. O estudo da convergência é também necessário a ter em conta nos trabalhos futuros e, ainda, a realização de uma análise modal (através do *Modal Acoustics*) de modo a obter as frequências naturais do espaço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. M. Lourenço. *The NOVAtthesis L^AT_EX Template User's Manual*. NOVA University Lisbon. 2021. URL: <https://github.com/joaomlourenco/novathesis/raw/main/template.pdf>.
- [2] Berg, R. E. (2019). Acoustics. Encyclopedia Britannica. Acedido em 10 fevereiro, 2023, de <https://www.britannica.com/science/acoustics>.
- [3] Rossing, T. (2007). *A Brief History of Acoustics*. Springer New York. DOI: 10.1007/978-0-387-30425-0₂..
- [4] Ortins S. (2016). *Acústica em open-space*. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
- [5] Meng, Q., et al. (2017). Effects of typical dining styles on conversation behaviours and acoustic perception in restaurants in China. *Building and Environment*, 121(8), 148–157. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.05.025.
- [6] Tarlao, C. et al. (2021). Influence of sound level on diners' perceptions and behavior in a montreal restaurant. *Applied Acoustics*. 174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107772>.
- [7] Fuchs, H. V. e Lamprecht, J. (2013). Covered broadband absorbers improving functional acoustics in communication rooms. *Applied Acoustics*. 74(1). 18-27. DOI: 10.1016/j.apacoust.2012.06.004.
- [8] Fuchs, H. V., et al. (2001). Creating low-noise environments in communication rooms. *Applied Acoustics*, Vol.62, pp. 1375-1396. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(01\)00008-1](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(01)00008-1).
- [9] Fuchs, H. (2013). *Applied acoustics: Concepts, absorbers, and silencers for acoustical comfort and noise control: Alternative solutions - Innovative tools - Practical examples*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-29367-2.
- [10] Sequeira, M. E., e Cortínez, V. H. (2012). A simplified two-dimensional acoustic diffusion model for predicting sound levels in enclosures. *Applied Acoustics*, 73(8), 842–848. DOI: 10.1016/j.apacoust.2012.02.012.

- [11] Liu, J., e Lu, P. (2009). Sound field prediction in long enclosures with branches: A combined method. *Applied Acoustics*. 71(4). 306-314. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.11.002>.
- [12] Tarabini, M., e Roure, A. (2008). Modeling of influencing parameters in active noise control on an enclosure wall. *Journal of Sound and Vibration*, 311(3-5), 1325–1339. DOI: 10.1016/j.jsv.2007.10.015.
- [13] Tarabini, M., e Roure, A. (2008). Modeling of influencing parameters in active noise control on an enclosure wall. *Journal of Sound and Vibration*, 311(3-5), 1325–1339. DOI: 10.1016/j.jsv.2007.10.015.
- [14] Khrystoslavenko, O., e Grubliauskas, R. (2017). Simulation of room acoustics using COMSOL Multiphysics. Vilnius Gediminas Technical University. DOI: 10.3846/aainz.2017.06.
- [15] Application and accuracy of computer simulation for the room acoustical improvement of gastronomic facilities: a case study. (2016). Acedido em 10 fevereiro 2023 de <http://www.ub.tuwien.ac.at>. [Artigo].
- [16] Li, Y., et al. (2021). A case study of acoustic treatment in a small restaurant. *Acoutect Demonstrator for Social Gathering Places*. Eindhoven University of Technology.
- [17] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., e Sanders, J. V. (1982). *Fundamentals of acoustics* (3.^a ed.). John Wiley e Sons, Inc.
- [18] International Year of Sound 2020-2021. (2020). Areas of Acoustics. Acedido em 8 de fevereiro de 2023, de <https://www.sound2020.org/acoustics/areas/>.
- [19] Everest, F. A., e Pohlmann, K. C. (2009). *Master Handbook of Acoustics* (5.^a ed.). McGraw-Hill.
- [20] Almeida, R. (2022). *Introdução ao Ruído. Vibrações mecânicas e Ruído*.
- [21] Chen, C. (2016). *Elements of Human Voice*. (1.^a ed.). Chelses. DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/9891>.
- [22] Crocker, M. J. (Ed.). (1998). *Handbook of Acoustics*. (1.^a ed.). John Wiley Son.
- [23] Guia indicativo de boas práticas para a aplicação da diretiva 2003/10/CE "Ruído no trabalho"(2009). Comissão europeia. DOI: 10.2767/29834. De <http://ec.europa.eu/>.
- [24] Ando, Y. (1998). *Architectural Acoustics*. (1.^a Ed.)
- [25] C. E. Acústica. *Tempo de reverberação*. [Informativo].
- [26] Kuttruff, H. (2017). *Room Acoustics* (6.^a edição). CRC Press.
- [27] The Science of Soundproofing. (s.d.). Acedido em 12 de fevereiro de 2023, de <https://www.soundstop.co.uk/science-of-soundproofing>.
- [28] Ferreira, J. S., e Ribeiro, C. (2018). Contribuição para o estudo de materiais e soluções de absorção sonora. Dissertação. DEC-FCTUC.

- [29] Chrisler, V. L. (1940). Effect of paint on the sound absorption of acoustic materials. Part of Journal of Research of the National Bureau of Standards, 24.
- [30] Ansys, Inc. (2017) Introduction to Acoustics.
- [31] Ansys, Inc. (2013) ANSYS Mechanical APDL Acoustic Analysis Guide.
- [32] Ansys, Inc. (2022). Mechanical User's Guide. Acedido em 8 fevereiro 2023 de <http://www.ansys.com>.
- [33] Kung, B e Willcox, T. (2006). Examination of Hearing and Balance. Neurology and Clinical Neuroscience: Text with CD-ROM. 318-327. doi: 10.1016/B978-0-323-03354-1.50029-8.
- [34] Sonômetro digital Casella CEL-246. (s.d.). Acedido em 9 de fevereiro de 2023, de <https://www.pce-medidores.com.pt/fichas-dados/sonometro-digital-casella-cel-246.htm>.
- [35] Dosímetro UVA - UVB PCE-UV34. Acedido em 9 de fevereiro de 2023, de <https://www.pce-medidores.com.pt/fichas-dados/dosimetro-uva-uvb-pce-uv34>.
- [36] Sistema Auditivo. Acedido em 10 de fevereiro de 2023, de <https://www.centraldafo.noaudiologia.com.br/tratamentos/sistema-auditivo/>.
- [37] Ministério do ambiente, do ordenamento do território e do desenvolvimento regional. (2007). Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de Janeiro.
- [38] Agência Portuguesa do Ambiente. (2020). Guia prático para medições de ruído ambiente.
- [39] Ministério do ambiente, do ordenamento do território e do desenvolvimento regional. (2008). Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho.
- [40] Koprowska, K et al. (2018). Subjective perception of noise exposure in relation to urban green space availability. Urban Forestry and Urban Greening. 31. 93-102.
- [41] Fast, Slow, Impulse Time Weighting - What do they mean?. Acedido em 11 de fevereiro de 2023, de <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-slow-impulse-time-weighting-what-do-they-mean>. [Site].
- [42] *Manual Party Light & Sound Party 8 LED*. [Manual de instruções].
- [43] Reboredo, E. (2008). Comportamento acústico de locais de restauração. Dissertação. Universidade de Aveiro.
- [44] Sound Fields: Free versus Diffuse Field, Near versus Far Field. Acedido em 27 de julho de 2023 de <https://community.sw.siemens.com/s/article/sound-fields-free-versus-diffuse-field-near-versus-far-field>.
- [45] *Introduction to ANSYS Meshing*. Manual Ansys. 2015.

- [46] Martellotta, F. et al. (2011). On the use of paintings and tapestries as sound absorbing materials "Innovative Composite Materials for Sound Absorption and Insulation" View project Journal Atmosphere: Section Air Quality and Human Health View project.
- [47] El-Mansy, M et al. (2011). Standard uncertainty of material size effect on sound absorption coefficient in reverberatin room Using of Nano-technology In Remediation of Pesticide Residues and Chemical Pollution of Drinking Water. View project Measurement Uncertainty Associated with Sound Power Determination Due to Room Variables View project. Applied Sciences Research.
- [48] Em: (). Naderzadeh, M. et al. (2018). An Investigation on Transparency and Mechano-Acoustic Properties of Poly Methyl Methacrylate/Polycarbonate Based Nanocomposites. Journal of Polymers and the Environment. 26(6). 2640-2649.
- [49] Mocka BT. Acedido em 20 de junho de 2023, de <https://www.skumacoustics.com/pt/bass-traps/38-mocka-bt-basstraps.html>.
- [50] Basotect® (MF) - A espuma de resina versátil de melamina. Acedido em 20 de junho de 2023, de https://plastics-rubber.basf.com/southamerica/pt/performance_polymers/industries/pp_automotive/products/basotect.html.
- [51] Conjunto de 4 Painéis Fonoabsorventes em Espuma Acústica para Paredes e Tectos L.30 x D.18 x A.18 cm preto. Acedido em 20 de junho de 2023 de <https://www.leroymerlin.pt/produtos/construcao/isolamento/isolamento-por-tipo-de-produto/espuma-acustica/conjunto-de-4-paineis-fonoabsorventes-em-espuma-acustica-para-paredes-e-tectos-l-30-x-d-18-x-a-18-cm-preto-84576131.html>.
- [52] Em: (). Jiang, F. et al. (2021). Acoustic/mechanical properties of polyurethane composites with syntactic hollow spheres. Polymers for Advanced Technologies. 32(3). 1363-1371.
- [53] Östanö Cadeira, preto Remmarn/cinz esc. Acedido em 27 de junho de 2023 de <https://www.ikea.com/pt/pt/p/oestanoecadeira-preto-remmarn-cinz-esc-20545359/>.
- [54] Silverlön Cortinados transparentes, par, branco. Acedido em 27 de junho de 2023 de <https://www.ikea.com/pt/pt/p/silverloenn-cortinados-transparentes-par-branco-20491040/>.
- [55] Em: (). Berardi, U. e Iannace, G. (2015). Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. Building and Environment. 94. 840-852.
- [56] Em: (). Berardi, U. e Iannace, G. (2017). Predicting the sound absorption of natural materials: Best-fit inverse laws for the acoustic impedance and the propagation constant. Applied Acoustics. 115. 131-138.
- [57] Carvalho, E. et al. (2014). Caracterização acústica de caixas de ovos e similares.

- [58] Kino Soft. Acedido em 20 de setembro de 2023 de <https://www.skumacoustics.com/pt/absorventes-acusticos/40-kino-soft.html>.
- [59] Spot Panel 50mm Acoustic Panel. Acedido em 27 de junho de 2023 de <https://gikacoustics.net/product/gik-acoustics-55mm-spot-panel/>.
- [60] Absorption coefficients. Acedido em 29 de junho de 2023 de www.akustik.ua.

APÊNDICE

A.1 Planta da Casa do Pessoal e dimensões

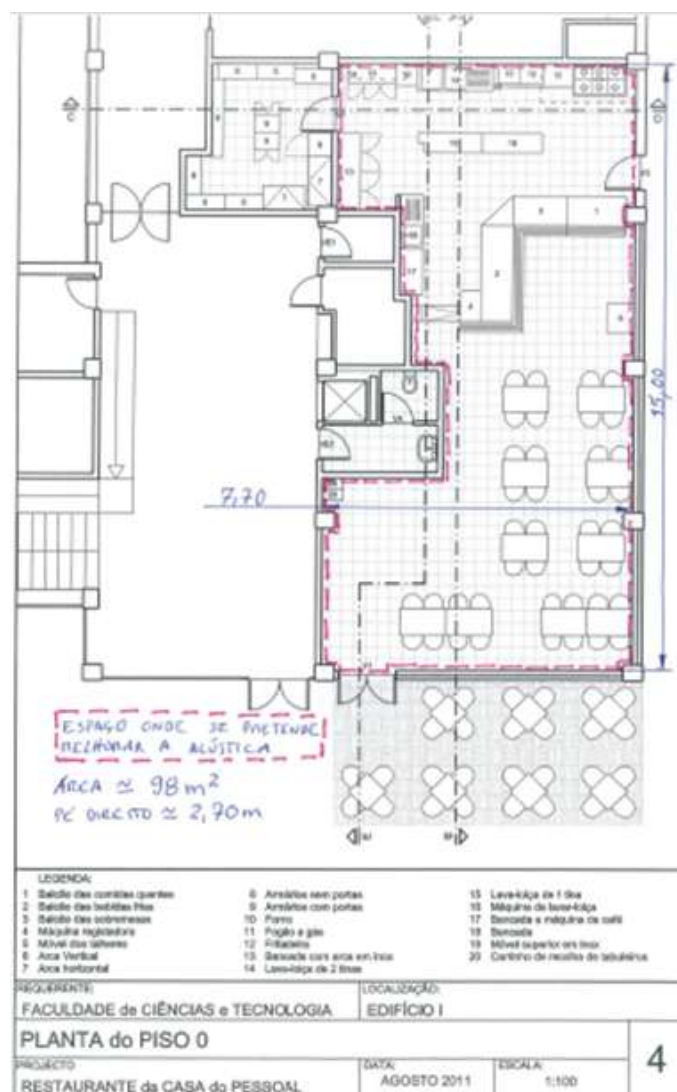


Figura A.1: Planta do espaço de restauração estudado.

A.2 Banda de frequências das bandas oitava e um terço de oitava

Tabela A.1: Banda de frequências das bandas oitava e um terço de oitava.

Frequência central (Hz)	Intervalo da banda oitava	Intervalo da banda um terço de oitava
25	—	22,4–28
31	22,4–45	28–35,5
40	—	35,5–45
50	—	45–56
63	45–90	56–71
80	—	71–90
100	—	90–112
125	90–180	112–140
160	—	140–180
200	—	180–224
250	180–355	224–280
315	—	280–355
400	—	355–450
500	355–710	450–560
630	—	560–710
800	—	710–900
1000	710–1400	900–1120
1250	—	1120–1400
1600	—	1400–1800
2000	1400–2800	1800–2240
2500	—	2240–2800
3150	—	2800–3550
4000	2800–5600	3550–4500
5000	—	4500–5600
6300	—	5600–7100
8000	5600–11200	7100–9000
10000	—	9000–11200
12500	—	11200–14000
16000	11200–22400	14000–18000
20000	—	18000–22400

A.3 Inquérito realizado aos funcionários da Casa do Pessoal

Claudia Oliveira
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica



Perceção do ruído na Casa do Pessoal – Questionário Anónimo

A acústica de um restaurante é um fator cada vez mais valorizado pelos clientes e funcionários, uma vez que um ambiente que apresente menor ruído contribui para o conforto e satisfação geral. Por isso, é crucial melhorar a acústica da Casa do Pessoal, já que as condições atuais podem acabar por interferir no bem-estar de todos. Para entender como o ruído afeta os funcionários, é fundamental obter informações através de um questionário que complementará a dissertação que apresenta o seguinte tema “Melhoramento das condições acústicas num espaço de restauração”.

As respostas são anónimas e devem ser respondidas com a maior objetividade possível.

Nas questões em que se aplique, considere a seguinte escala: 1 – Absolutamente nada (...); 2 – Ligeiramente (...); 3 – Moderadamente (...); 4 – Muito (...); 5 – Extremamente (...).

1. Em que grupo etário se insere? (anos)

- ☐ Menos de 21
- ☐ 21 – 30
- ☐ 31 – 40
- ☐ 41 – 50
- ☐ 51 – 60
- ☐ Mais de 60

2. Qual é a sua sensibilidade ao ruído nas horas que apresentem um maior número de pessoas presentes no restaurante, ou seja, nas horas de maior ruído? Sendo 1 absolutamente nada sensível e 5 extremamente sensível.

☐	☐	☐	☐	☐
1	2	3	4	5

3. Considerando o seu horário de trabalho, indique para cada hora, o valor entre 1 e 5, que represente o desconforto relativamente ao ruído presente no restaurante. Sendo 1 absolutamente nada desconfortável e 5 extremamente desconfortável.

8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Casa do Pessoal, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
março de 2023

Figura A.2: Primeira página do inquérito realizado aos funcionários.

4. Na sua perceção, selecione a fonte de ruído que mais o/a perturba na hora de maior incomodidade:

- ☐ Conversa entre pessoas.
- ☐ Equipamentos elétricos.
- ☐ Barulho dos tachos.
- ☐ Barulho de cadeiras e mesas a arrojarem.
- ☐ Outro: _____

5. Relativamente à fonte de ruído mencionada anteriormente, qual é a sua incomodidade? Sendo 1 absolutamente nada incomodativo e 5 extremamente incomodativo.

☐	☐	☐	☐	☐
1	2	3	4	5

6. Qual é a sua sensibilidade para a mudança súbita de estado de silêncio para ruído intenso? Sendo 1 absolutamente nada sensível e 5 extremamente sensível.

☐	☐	☐	☐	☐
1	2	3	4	5

7. Nos dias em que o nível de ruído é mais elevado, sente algum tipo de desconforto físico ou emocional associado ao ruído? Se sim, costuma sentir o quê? Exemplos de desconforto físico: dor de cabeça, cansaço excessivo, entre outros. Exemplos de desconforto emocional: irritabilidade, stress, entre outros.

Figura A.3: Segunda página do inquérito realizado aos funcionários.

A.4. GRÁFICOS DO NÍVEL DA PRESSÃO SONORA EM FUNÇÃO DO TEMPO RELATIVO OBTIDOS PARA O MÉTODO DO RUÍDO INTERROMPIDO

A.4 Gráficos do nível da pressão sonora em função do tempo relativo obtidos para o método do ruído interrompido

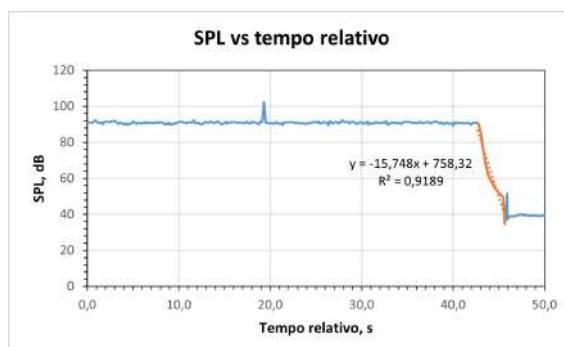


Figura A.4: Decaimento do SPL para medição 1, posição 1 e 500 Hz.

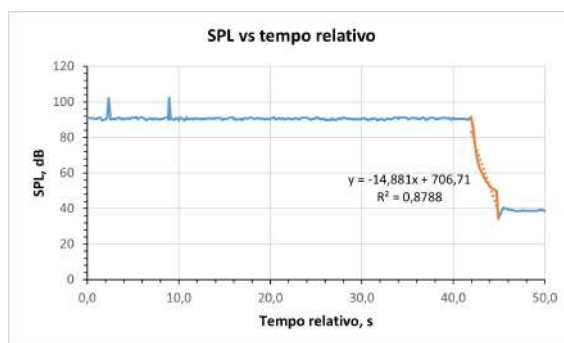


Figura A.5: Decaimento do SPL para medição 2, posição 1 e 500 Hz.

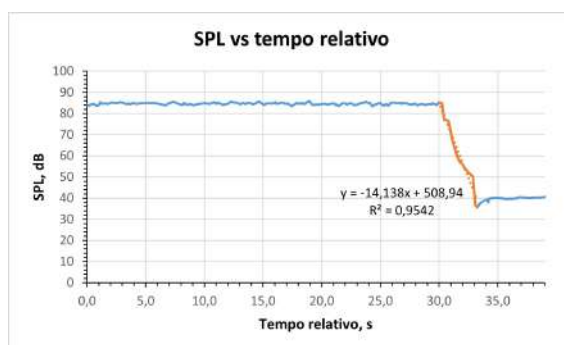


Figura A.6: Decaimento do SPL para medição 1, posição 2 e 500 Hz.

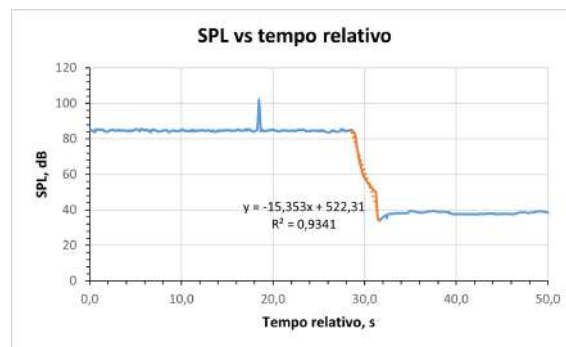


Figura A.7: Decaimento do SPL para medição 2, posição 2 e 500 Hz.

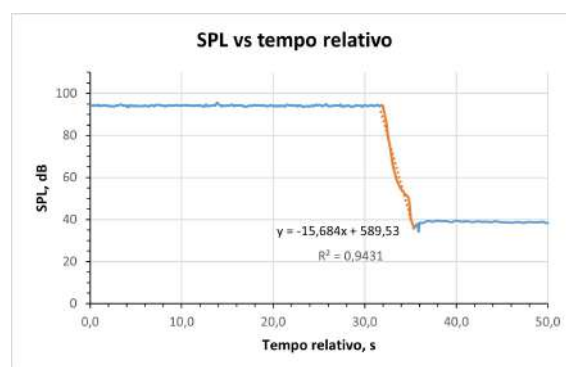


Figura A.8: Decaimento do SPL para medição 1, posição 1 e 1000 Hz.

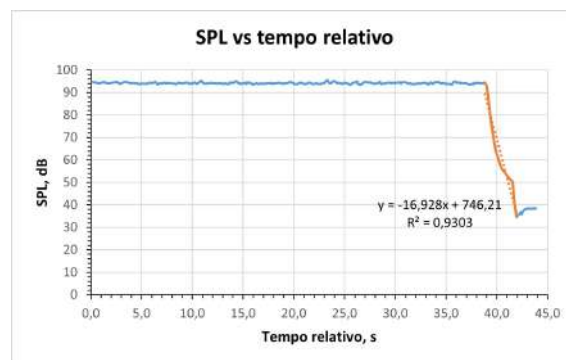


Figura A.9: Decaimento do SPL para medição 2, posição 1 e 1000 Hz.

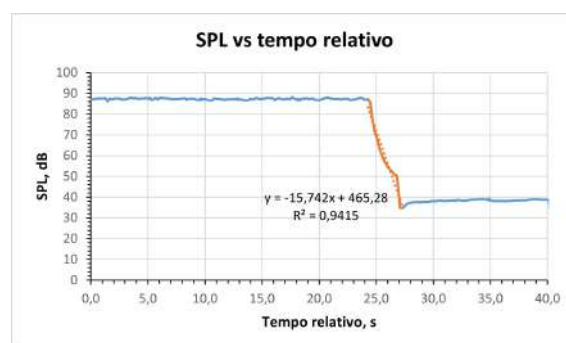


Figura A.10: Decaimento do SPL para medição 1, posição 2 e 1000 Hz.

A.4. GRÁFICOS DO NÍVEL DA PRESSÃO SONORA EM FUNÇÃO DO TEMPO RELATIVO OBTIDOS PARA O MÉTODO DO RUÍDO INTERROMPIDO

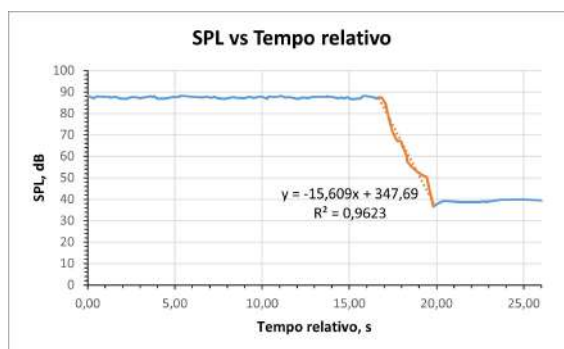


Figura A.11: Decaimento do SPL para medição 2, posição 2 e 1000 Hz.

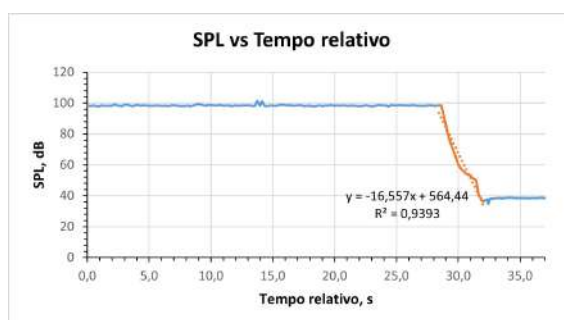


Figura A.12: Decaimento do SPL para medição 1, posição 1 e 2000 Hz.

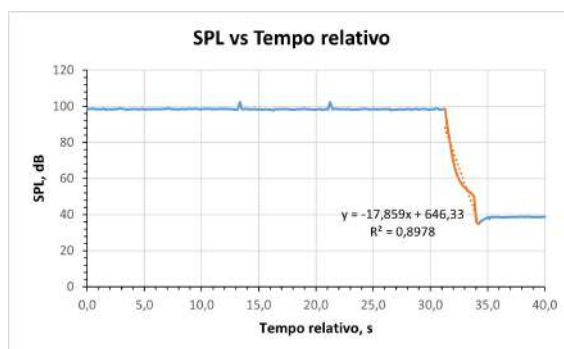


Figura A.13: Decaimento do SPL para medição 2, posição 1 e 2000 Hz.

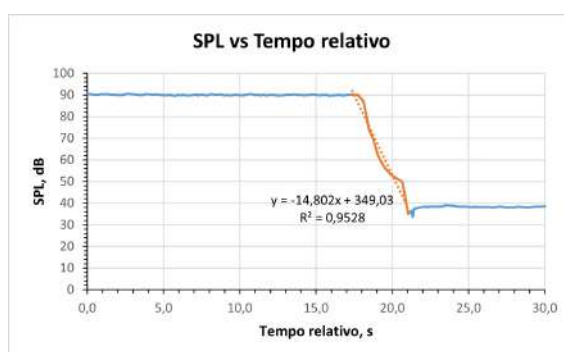


Figura A.14: Decaimento do SPL para medição 1, posição 2 e 2000 Hz.

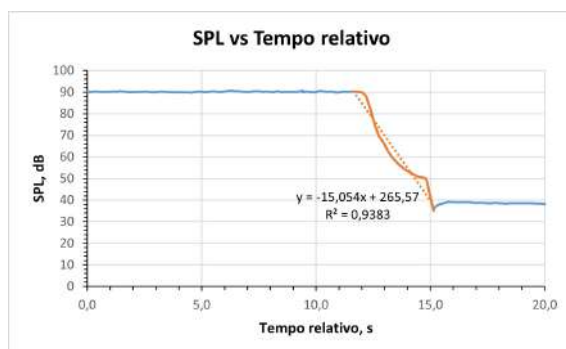


Figura A.15: Decaimento do SPL para medição 2, posição 2 e 2000 Hz.

A.5 Gráficos do nível da pressão sonora em função do tempo relativo obtidos para o método do rebentamento do balão.

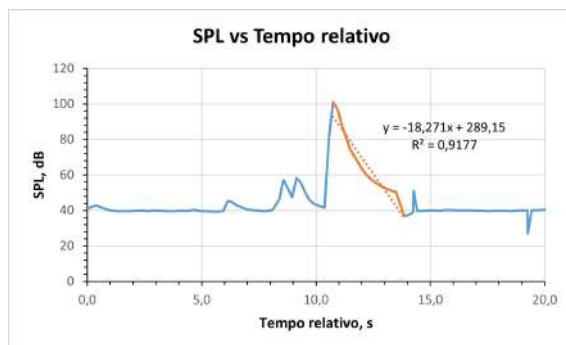


Figura A.16: Decaimento do SPL para medição 1 e posição 1, segundo o método do rebentamento do balão.

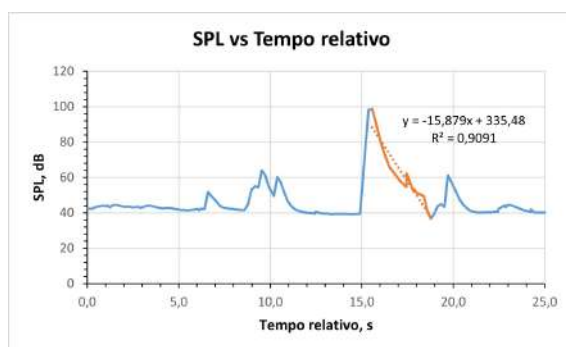


Figura A.17: Decaimento do SPL para medição 2 e posição 1, segundo o método do rebentamento do balão.

A.5. GRÁFICOS DO NÍVEL DA PRESSÃO SONORA EM FUNÇÃO DO TEMPO RELATIVO OBTIDOS PARA O MÉTODO DO REBENTAMENTO DO BALÃO.

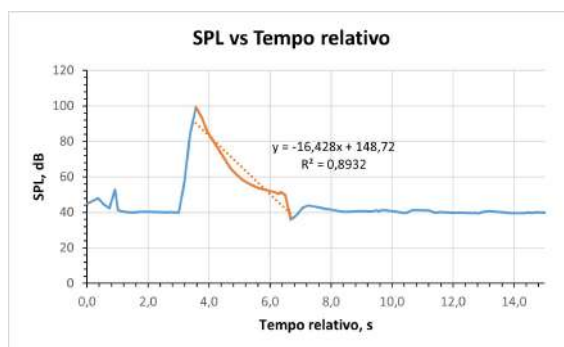


Figura A.18: Decaimento do SPL para medição 1 e posição 2, segundo o método do rebentamento do balão.

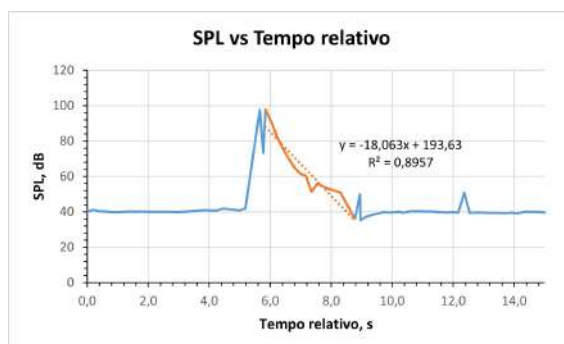


Figura A.19: Decaimento do SPL para medição 2 e posição 2, segundo o método do rebentamento do balão.

