

EFEITO DO USO E DE PINTURA EM SISTEMA ABSORVENTE SONORO

DIOGO MOTA DE OLIVEIRA

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

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2021

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2020/2021

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2020/2021 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2021*.

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

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

À minha família e à Adriana

" If money is your hope for independence, you will never have it. The only real security that a man can have in this world is a reserve of knowledge, experience and ability."

Henry Ford

AGRADECIMENTOS

Com a finalização desta última etapa no meu processo académico na FEUP, gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que fizeram parte deste percurso, das pessoas que me conheceram e seguiram desde o primeiro ano em que entrei na faculdade até a este último ano de conclusão. Toda a gente que aqui conheci tornou-me uma pessoa melhor e agradeço a todas as oportunidades realizadas e todos os projetos concretizados até a data que ajudaram a tornar-me na pessoa que hoje sou e a tornar este longo e estudioso percurso académico memorável.

Começando por agradecer ao Professor António Oliveira de Carvalho, o meu orientador, por ter-me permitido realizar este documento com a tutoria de um Engenheiro que muito admiro e ter-me ajudado, guiado e corrigido sempre que necessário com o profissionalismo e paixão que sempre transmitiu durante as aulas que leciona. Foi sem dúvida uma das pessoas mais marcantes ao longo do meu percurso académico e que espero voltar a encontrar ao longo do meu percurso profissional.

Ao Engenheiro Eduardo Costa pela simpatia, boa disposição e pela disponibilidade que ofereceu na ajuda da realização dos ensaios acústicos que me acabaram por transmitir uma possível ferramenta, assim como uma ampliação do meu conhecimento sobre o tema.

A S.T.I.E.R. porque sem eles seriam impossível realizar este documento, queria agradecê-los pela disponibilidade e por ter facultado as amostras assim como o pessoal e material para a pintura das mesmas, consoante os altos padrões que a empresa representa.

Aos meus amigos que conheci aqui na faculdade e que mantenho contacto, estas pessoas ajudaram-me a ultrapassar esta grande etapa da minha vida e nunca me falharam quando lhes pedi auxílio.

À minha mãe e ao meu pai, que transmitiram para mim todos os seus valores, que faço questão de seguir na minha vida pessoal e profissional. Que me ajudaram a atingir este cúmulo de 300 créditos, moldando a pessoa que hoje sou. Por todo o apoio que me ofereceram, paciência que tiveram de aguentar e meios que me proporcionaram para a realização deste longo, mas curto percurso aqui na FEUP. Sempre me incentivaram a seguir os meus sonhos sejam eles quais fossem e sempre o fizeram com o maior amor que possa existir entre pais e filhos.

À Adriana que me acompanhou desde o meu 12.º ano, acompanhou todos os meus momentos felizes e mais infelizes durante a faculdade e foi sem dúvida o meu maior pilar aos longos destes anos todos. Sem ela nenhuma destas conquistas seriam possíveis por isso um profundo obrigado por todo o amor proporcionado que me ajudou a ultrapassar esta fase da minha vida.

A todos que não mencionei, mas fizeram parte do meu sucesso aqui na FEUP, o meu mais sincero obrigado!

RESUMO

O desenvolvimento de aplicações com melhorias nos resultados acústicos é um dos grandes desafios que a Acústica de Edifícios enfrenta, muitas vezes ignorado ou conquistando pouca atenção, em contraste com a arquitetura, sobretudo no *design* interior. Na maioria dos casos, a principal preocupação tem por foco a estética, desvalorizando-se o comportamento acústico dos edifícios. Das várias soluções que atuam no melhoramento deste comportamento, tanto em edifícios novos como já existentes, a mais usual consiste na utilização de materiais absorventes sonoros. No caso em análise, o foco principal consiste num sistema de absorção sonora poroso. Apesar de muitas vezes estes materiais não serem considerados esteticamente agradáveis, é possível, no entanto conseguir obter uma boa combinação entre a arquitetura e um bom resultado acústico, um compromisso que beneficia ambas as partes.

Esta dissertação tem como objetivo estudar o impacto da pintura num sistema absorvente sonoro, assim como, o efeito do tempo de utilização neste tipo de sistemas.

Este tipo de sistema absorvente sonoro (porosos) tem como principal característica a grande eficácia absorvente de frequências altas. O fenómeno que garante a estes materiais a capacidade de absorver determinado tipo de frequência está relacionado com a existência de múltiplos poros no mesmo, pelo que no momento da incidência das ondas sonoras no material, estas dissipam parte da energia nos seus minúsculos poros.

A característica de maior relevância procurada neste material pode vir a ser neutralizada com o preenchimento dos poros que são necessários para a absorção sonora. A pintura tem como particularidade preencher os poros dos materiais na qual é aplicada, o que pode contrariar totalmente a eficácia dos mecanismos de absorção sonora porosos.

Um dos objetivos deste documento é, portanto, avaliar os efeitos da pintura e da sua aplicação neste tipo de revestimentos, percebendo o impacto prejudicial do tempo (anos de utilização) assim como o impacto da aplicação de pinturas nestes mecanismos. Foi utilizado o método de pintura a pistola (*spray*), de forma a não preencher totalmente os poros que são de importância primordial para a utilização destes mecanismos.

Para tal, analisou-se um sistema fornecido pela empresa S.T.I.E.R. conhecido comercialmente por *Sonacoustic® ALM*. Este sistema é composto por lã mineral barrada superficialmente com um composto próprio do fabricante. Efetuou-se vários ensaios em câmara reverberante segundo a metodologia normalizada para quantificar a variação dos valores do coeficiente de absorção sonora (α_s). Este sistema foi fornecido depois de estar em utilização cerca de 9 anos na estação de metro do Porto “Campo 24 de Agosto” de forma a se poder estudar quais os efeitos que os anos de utilização provocaram acusticamente ao sistema. Foi também analisado o efeito da pintura a pistola neste sistema e o efeito que o barramento superficial tem após anos de utilização.

Conclui-se neste trabalho que o efeito dos anos de utilização em praticamente nada altera os valores do coeficiente de absorção sonora, podendo inclusive melhorar, tal como foi o caso deste estudo, funcionando como um “fermento acústico”. A pintura, se aplicada com recurso a *spray*, tem um efeito reduzido ou quase nulo na capacidade do sistema de dissipar energia através dos seus poros, sendo uma solução eficaz para encontrar o compromisso estético desejado e frequentemente requerido pelos clientes. Conclui-se também que o efeito do barramento superficial torna o sistema menos competente ao longo dos anos.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Sistema absorvente sonoro, Tinta, Coeficiente de absorção sonora, Uso.

ABSTRACT

The development of applications with improved acoustic results is one of the great challenges that Building Acoustics faces, often ignored or acquiring not much attention, in contrast to architecture, especially in interior design. In most cases, the main concern is focused on aesthetics, undervaluing the acoustic behaviour of buildings. Of the various solutions to improve this behaviour, both in new and existing buildings, the most common is the use of sound-absorbing materials. In the case under analysis, the main focus is a porous sound absorption system. Although these materials are often not considered aesthetically pleasing, it is nevertheless possible to achieve a good combination of architecture and a good acoustic result, a compromise that benefits both parties.

This dissertation aims to study the impact of painting on a sound absorbing system, as well as the effect of usage time in this type of system.

This type of sound absorbing system (porous) has as its main characteristic the great absorption efficiency of high frequencies. The phenomenon that guarantees these materials the ability to absorb a certain type of frequency is related to the existence of multiple pores in them, so that at the time of incidence of sound waves in the material, they dissipate part of the energy in their very small pores.

The most relevant feature required in this material may be neutralized by filling the pores that are necessary for sound absorption. The particularity of the painting is to fill the pores of the materials to which it is applied, which can totally counteract the effectiveness of porous sound absorption mechanisms.

One of the objectives of this document is, therefore, to evaluate the effects of painting and its application in this type of coating, realizing the detrimental impact of time (years of use) as well as the impact of applying paints on these mechanisms. The spray-painting method was used, in order not to completely fill the pores that are of primordial importance for the use of these mechanisms.

For this purpose, a system provided by the company S.T.I.E.R. commercially known as Sonacoustic® ALM was analysed. This system is composed of mineral wool surfaced with the manufacturer's own compound. Several tests were carried out in a reverberant chamber according to the standardized methodology to quantify the variation in the values of the sound absorption coefficient (α_s). This system was supplied after being in use for about 9 years at the Porto metro station "Campo 24 de Agosto" to be able to study the effects that years of use had acoustically caused to the system. The effect of spray painting on this system and the effect that surface application has after years of use was also analysed.

It is concluded in this work that the effect of years of use in practically nothing changes the values of the sound absorption coefficient, and it can even improve, as was the case in this study, working as an "acoustic yeast". The paint, if applied using a spray, has little or no effect on the system's ability to dissipate energy through its pores, being an effective solution to find the desired aesthetic compromise often required by customers. It is also concluded that the surface barrier effect makes the system less competent over the years.

KEYWORDS: Acoustics, Sound absorbing system, Paint, Sound absorption coefficient, Use.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE QUADROS	XV
SÍMBOLOS, UNIDADES, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	XVII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS.....	1
1.2. ESTRUTURA	2
2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES	3
2.1. INTRODUÇÃO.....	3
2.2. PRINCÍPIOS BÁSICOS	3
2.2.1. SOM E RUÍDO	3
2.2.2. PRESSÃO SONORA	4
2.2.2.1. Variação de Pressão	4
2.2.2.2. Intensidade e Potência Sonora	5
2.2.2.3. Níveis.....	6
2.2.2.4. Pressão eficaz.....	7
2.2.3. FREQUÊNCIA	7
2.2.3.1. Definição	7
2.2.3.2. Bandas de Frequência	9
2.2.3.3. Curvas de Ponderação.....	9
2.2.4. ANÁLISE NO TEMPO	10
2.3. ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS	11
2.3.1. ABSORÇÃO SONORA	11
2.3.1.1. Definições.....	11
2.3.1.2. Determinação do Coeficiente de Absorção Sonora	12
2.3.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	14
2.3.2.1. Definição e Conceitos.....	14
2.3.2.2. Medição.....	15
2.3.2.3. Efeitos do Tempo de Reverberação	15

2.3.2.4. Fórmula de Previsão do Tempo de Reverberação	16
2.3.3. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS	16
2.3.3.1. Conceitos	16
2.3.3.2. Materiais Porosos e Fibrosos.....	17
2.3.3.3. Ressonadores.....	21
2.3.3.4. Membranas	21
2.3.3.5. Colocação de Materiais Absorventes	22
3 ESTADO DA ARTE.....	23
3.1. INTRODUÇÃO.....	23
3.2. ABSORÇÃO SONORA	23
3.3. EFEITO DA TINTA	24
4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS	37
4.1. METODOLOGIA DOS ENSAIOS	37
4.1.1. INTRODUÇÃO.....	37
4.1.2. MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	37
4.1.3. MÉTODO DE CÁLCULO	40
4.2. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA	42
4.2.1. SONACOUSTIC® ALM	42
4.2.2. LÃ MINERAL ISOVER	47
5 RESULTADOS	51
5.1. SONACOUSTIC® ALM.....	51
5.1.1. RESULTADO AMOSTRAS	51
5.1.2. VARIAÇÃO DOS VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DEVIDO AO EFEITO DA TINTA	54
5.1.3. $NRC E \alpha_w$	56
5.2. LÃ MINERAL ISOVER.....	57
5.2.1. RESULTADO AMOSTRAS	57
5.2.2. VARIAÇÃO DOS VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DEVIDO AO EFEITO DA TINTA	58
5.2.3. $NRC E \alpha_w$	60
5.3. EFEITO DO BARRAMENTO SUPERFICIAL APÓS ANOS DE UTILIZAÇÃO	61
6 CONCLUSÕES	65
6.1. CONCLUSÕES GLOBAIS	65
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	66

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo de propagação de uma onda sonora (adaptado de [2]).	3
Figura 2.2 – Analogia de propagação de onda sonora (adaptado de [3]).	4
Figura 2.3 – Inter-relação entre potência (W), pressão (p) e intensidade (I) (adaptado de [3]).	5
Figura 2.4 – Pressão sonora p e níveis de pressão sonora L_p (adaptado de [4]).	6
Figura 2.5 – Exemplos práticos de gamas de frequências [1].	7
Figura 2.6 – Gama de frequências (humanos) (adaptado de [5]).	8
Figura 2.7 – Exemplo de espectros sonoros de um mesmo ruído em bandas de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava [1].	9
Figura 2.8 – Descrição das curvas de ponderação (filtros) A , B , C e D (adaptado de [6]).	10
Figura 2.9 – Processo de absorção sonora (adaptado de [7]).	11
Figura 2.10 – Tubo de ondas estacionárias [foto do autor].	13
Figura 2.11 – Determinação do α em câmara reverberante (amostra sobre o pavimento) [1].	14
Figura 2.12 – Ondas sonoras de origem <i>direta</i> e <i>refletida</i> (adaptado de [9]).	14
Figura 2.13 – Definição de Tempo de Reverberação T (valor teórico, esq. e obtido por extrapolação do declive, dir.) (adaptado de [1]).	15
Figura 2.14 – Comportamento em frequência dos três tipos de materiais e sistemas absorventes sonoros (adaptado de [10]).	17
Figura 2.15 – Exemplos de coeficientes de absorção sonora para alcatifas (esq.) e reposteiros em função da área de pano usado (dir.) (adaptado de [1]).	18
Figura 2.16 – Exemplos de coeficientes de absorção sonora para amostra com 38 mm de espessura de painéis de aparas de madeira [1].	19
Figura 2.17 – Coeficientes de absorção sonora para painéis de material poroso (lã de vidro) em função da espessura (esq.), da massa específica (centro) e da largura da caixa de ar (dir.) (adaptado de [1]).	20
Figura 2.18 – Coeficientes de absorção sonora para painéis de material plásticos expandidos (1: poliuretano expandido, 50 mm espessura – 2: poliestireno expandido, 25 mm de espessura) (esq.) e espuma de poliuretano (<i>Sonex</i>) (50, 75 e 100mm) (dir.) (adaptado de [1]).	20
Figura 2.19 – Coeficientes de absorção sonora para painéis de aglomerado de cortiça (aglomerado negro de 20 a 40 mm de espessura à esq. e aglomerado compostos de 3 a 6 mm à dir.) (adaptado de [1]).	21
Figura 2.20 – Exemplo de aplicação de absorsores suspensos (adaptado de [11]).	22
Figura 3.1 – Aspeto geral das amostras 1 e 2 (esq.) e aparência da superfície das amostras 1 e 2 previamente à pintura (ampliada) (dir.) [25].	25
Figura 3.2 – Aparência da superfície da amostra 1 e 2 depois de pintada com pincel com cinco demãos de tinta (ampliada) [25].	25

Figura 3.3 – Aspeto geral da amostra 3 (esq.) e aparência da superfície da amostra 3 previamente à pintura (ampliada) (dir.) [25].	26
Figura 3.4 – Aparência da superfície da amostra 3 depois de pintada com pincel com cinco demãos de tinta (ampliada) [25].	26
Figura 3.5 – Aspeto geral da amostra 4 (esq.) e aparência da superfície da amostra 4 previamente à pintura (ampliada) (dir.) [25].	27
Figura 3.6 – Aparência da superfície da amostra 4 depois de pintada com pincel com 4 demãos de tinta (ampliada) [25].	27
Figura 3.7 – Aspeto geral da amostra 5 (esq.) e aparência da superfície da amostra 4 previamente à pintura (ampliada) (dir.) [25].	28
Figura 3.8 – Aparência da superfície da amostra 5 depois de pintada com pincel com cinco demãos de tinta (esq.) e com pistola de pintura com sete camadas de tinta (dir.) (ampliada) [25].	28
Figura 3.9 – Aspeto geral da amostra 6 (esq.) e aparência da superfície da amostra 6 previamente à pintura (ampliada) (dir.) [25].	29
Figura 3.10 – Aparência da superfície da amostra 6 depois de pintada com pincel com quatro demãos de tinta (ampliada) [25].	29
Figura 3.11 – Aparência da superfície da amostra 7 depois de pintada com pincel com seis demãos de tinta (ampliada) [25].	30
Figura 3.12 – Aparência da superfície da amostra 8 depois de pintada com pincel com quatro demãos de tinta (ampliada) [25].	30
Figura 3.13 – Aparência da superfície da amostra 9 antes de ser aplicada pintura (ampliada) [25].	31
Figura 3.14 – Aparência da superfície da amostra 9 depois de ter sido aplicada cinco demãos de pintura com pincel (ampliada) [25].	31
Figura 4.1 – Sonómetro <i>Bruel & Kjaer 2260</i> (esq.) e fonte sonora <i>Bruel & Kjaer 4224</i> (dir.) [fotos do autor].	40
Figura 4.2 – Valores do coeficiente de absorção sonora em função da frequência da amostra <i>Sonacoustic® ALM</i> com espessura de 33,5 mm (com painel base de 30 mm e 3,5 mm de ALM) realizado pela LBP/SIGHT (adaptado de [30]).	43
Figura 4.3 – Disposição das placas de <i>Sonacoustic® ALM</i> no piso da câmara reverberante para a realização do ensaio sem pintura [foto do autor].	45
Figura 4.4 – Realização do processo de pintura à <i>spray</i> da amostra de <i>Sonacoustic® ALM</i> [foto do autor].	45
Figura 4.5 – Tinta de silicato utilizada nos ensaios experimentais [fotos do autor].	46
Figura 4.6 – Disposição das placas de <i>Sonacoustic® ALM</i> no piso da câmara reverberante para a realização do ensaio após pintura [foto do autor].	46
Figura 4.7 – Pormenor de um painel da amostra de <i>Sonacoustic® ALM</i> , onde é visível a massa de barramento antes de qualquer processo (esq.) e após pintura (dir.) [fotos do autor].	47
Figura 4.8 – Disposição das placas de <i>Sonacoustic® ALM</i> expostas (viradas do avesso) no piso da câmara reverberante para a realização do ensaio da lã mineral <i>ISOVER</i> sem pintura [foto do autor].	48

Figura 4.9 – Realização do processo de pintura à <i>spray</i> da amostra de lã mineral <i>ISOVER</i> [foto do autor].	48
Figura 4.10 – Disposição das placas de <i>Sonacoustic® ALM</i> expostas (viradas do avesso) no piso da câmara reverberante para a realização do ensaio da lã mineral <i>ISOVER</i> após pintura [foto do autor].	49
Figura 4.11 – Pormenor de um painel da amostra de lã mineral <i>ISOVER</i> sem pintura (esq.) e com pintura (dir.) [fotos do autor].	49
Figura 5.1 – Valores do coeficiente de absorção sonora <i>Sonacoustic® ALM</i> nova e antiga <i>antes</i> e <i>após</i> aplicação da pintura com pistola (<i>spray</i>).....	53
Figura 5.2 – Valores do coeficiente de absorção sonora <i>Sonacoustic® ALM</i> nova e de catálogo.	53
Figura 5.3 – Valores de $\Delta\alpha_s = \alpha_s \text{ após pintura} - \alpha_s \text{ antes pintura}$, nas bandas de frequência de 1/3 de oitava dos 100 aos 5000 Hz da amostra antiga de <i>Sonacoustic® ALM</i>	55
Figura 5.4 – Diferença em percentagem ($\Delta\alpha_s P = (\alpha_s \text{ Depois} - \alpha_s \text{ Antes})/\alpha_s \text{ Antes}(\%)$) nos valores do coeficiente de absorção sonora <i>após</i> e <i>antes</i> de pintura na amostra antiga <i>Sonacoustic® ALM</i>	55
Figura 5.5 – Valores do coeficiente de absorção sonora da lã mineral <i>ISOVER</i> <i>antes</i> e <i>após</i> aplicação da pintura com pistola (<i>spray</i>).	58
Figura 5.6 – Valores de $\Delta\alpha_s = \alpha_s \text{ após pintura} - \alpha_s \text{ antes pintura}$, nas bandas de frequência de 1/3 de oitava dos 100 aos 5000 Hz da amostra de lã mineral <i>ISOVER</i>	59
Figura 5.7 – Diferença em percentagem ($\Delta\alpha_s P = (\alpha_s \text{ Depois} - \alpha_s \text{ Antes})/\alpha_s \text{ Antes}(\%)$) entre a capacidade de absorção sonora <i>após</i> e <i>antes</i> de pintura da amostra de lã mineral <i>ISOVER</i>	60
Figura 5.8 – Valores do coeficiente de absorção sonora da solução <i>Sonacoustic® ALM</i> em comparação com a lã mineral <i>ISOVER</i>	61
Figura 5.9 – Valores de $\Delta\alpha_s = \alpha_s \text{ Sonacoustic® ALM} - \alpha_s \text{ lã mineral ISOVER}$, nas bandas de frequência de 1/3 de oitava dos 100 aos 5000 Hz.	62
Figura 5.10 – Diferença em percentagem ($\Delta\alpha_s P = (\alpha_s \text{ Depois} - \alpha_s \text{ Antes})/\alpha_s \text{ Antes}(\%)$) entre a capacidade de absorção sonora da solução completa de <i>Sonacoustic® ALM</i> em comparação com unicamente a lã mineral <i>ISOVER</i> 30 mm.	63

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Valores de coeficientes de absorção sonora (α) de alguns materiais ou sistemas (adaptado de [1]).	12
Quadro 2.2 – Coeficientes de absorção sonora para massa porosa projetada ($K13$) aplicada sobre superfície rígida em diversas espessuras (** sobre caixa de ar) (adaptado de [1]).	18
Quadro 3.1 – Valores dos coeficientes de absorção sonora para as amostras ensaiadas (adaptado de [25]).	32
Quadro 3.2 – Valores dos coeficientes de absorção sonora (α_s) das cinco amostras testadas <i>antes</i> e <i>depois</i> de pintura (adaptado de [26]).	34
Quadro 3.3 – Variação dos valores do coeficiente de absorção sonora ($\Delta\alpha_s$) em valores absolutos e sobre a forma de percentagem ($\Delta\alpha_s P$ (%)), das cinco amostras testadas <i>depois</i> e <i>antes</i> de pintura (adaptado de [26]).	35
Quadro 3.4 – Variação dos valores de NRC e α_w obtidos nas cinco amostras <i>antes</i> e <i>depois</i> de pintura (adaptado de [26]).	35
Quadro 4.1 – Valores de área máxima de absorção equivalente corrigidos de acordo com a normalização para o volume da câmara $R1$.	38
Quadro 4.2 – Valores de m' e a' utilizados para a determinação do coeficiente de absorção sonora adaptados para a câmara $R1$ (humidade relativa de 55% e temperatura de 18° C) (adaptado de [28]).	41
Quadro 4.3 – Composição do painel de lã mineral de alta densidade usado na composição do <i>Sonacoustic® ALM</i> (adaptado de [29]).	42
Quadro 4.4 – Composição da massa de barramento (ALM) usado na composição do <i>Sonacoustic® ALM</i> (adaptado de [29]).	42
Quadro 4.5 – Desempenho acústico da amostra <i>Sonacoustic® ALM</i> fornecido pelo fabricante com espessura de 33 mm (com painel base de 31 mm) (adaptado de [29]).	43
Quadro 4.6 – Desempenho acústico da amostra <i>Sonacoustic® ALM</i> com espessura de 33,5 mm (com painel base de 30 mm com densidade de 96 kg/m ³ e 3,5 mm de ALM) realizados pela empresa $LBP/SIGHT$ (adaptado de [30]).	44
Quadro 5.1 – Valores dos tempos de reverberação e dos coeficientes de absorção sonora (α_s) das amostras antigas de <i>Sonacoustic® ALM</i> <i>antes</i> e <i>após</i> aplicação da pintura com pistola (<i>spray</i>), assim como os coeficientes de absorção sonora (α_s) de <i>Sonacoustic® ALM</i> novas e de catálogo.	52
Quadro 5.2 – Diferenças entre os valores do coeficiente de absorção sonora ($\Delta\alpha_s = \alpha_s$ <i>após</i> <i>pintura</i> – α_s <i>pré</i> <i>pintura</i>) da amostra antiga de <i>Sonacoustic® ALM</i> , <i>depois</i> e <i>antes</i> da pintura.	54
Quadro 5.3 – Valores de NRC , α_w e <i>classe</i> da amostra <i>Sonacoustic® ALM</i> de catálogo, novas e antiga testada <i>depois</i> e <i>antes</i> da pintura.	56
Quadro 5.4 – Coeficientes de absorção sonora (α_s) das amostras de lã mineral <i>ISOVER</i> <i>antes</i> e <i>após</i> aplicação da pintura com pistola (<i>spray</i>) e tempos de reverberação.	57
Quadro 5.5 – Diferenças entre os valores do coeficiente de absorção sonora ($\Delta\alpha_s = \alpha_s$ <i>após</i> <i>pintura</i> – α_s <i>antes</i> <i>pintura</i>) da amostra de sonora lã mineral <i>ISOVER</i> , <i>depois</i> e <i>antes</i> da pintura.	59

Quadro 5.6 – Valores de <i>NRC</i> , α_w e <i>classe</i> da amostra Lã Mineral <i>ISOVER</i> 30mm, <i>depois</i> e <i>antes</i> da pintura.....	60
Quadro 5.7 – Diferenças entre os valores do coeficiente de absorção sonora ($\Delta\alpha_s$) da amostra completa antiga de <i>Sonacoustic® ALM</i> e unicamente da lã mineral <i>ISOVER</i>	62
Quadro 5.8 – Valores de <i>NRC</i> , α_w e <i>classe</i> da amostra lã mineral <i>ISOVER</i> 30 mm e <i>Sonacoustic® ALM</i>	63

SÍMBOLOS, UNIDADES, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

α – Coeficiente de absorção sonora

α_s – Coeficiente de absorção sonora de Sabine

$\bar{\alpha}_s$ – Coeficiente de absorção sonora de Sabine médio

α_w – Coeficiente de absorção sonora ponderado

$\Delta\alpha_s$ – Variação do coeficiente de absorção sonora

$\Delta\alpha_{sP}$ – Variação percentual do coeficiente de absorção sonora

Θ – Temperatura do ar [° C]

ρ – Massa volúmica [kg/m³]

a' – Coeficiente de atenuação atmosférica usado na norma NP ISO 9613-1

A – Absorção sonora equivalente [m²]

A_1 – Área de absorção sonora equivalente da sala vazia [m²]

A_2 – Área de absorção sonora equivalente da sala com amostra [m²]

A_T – Área de absorção sonora equivalente da amostra testada [m²]

B – Largura de banda de frequências

c – Celeridade do som [m/s]

dB – Decibel (unidade de medida)

dB_(A) – Nível sonoro, ponderado do filtro A

f – Frequência [Hz]

f_0 – Frequência central de banda [Hz]

f_1 – Frequência limite inferior de banda [Hz]

f_2 – Frequência limite superior de banda [Hz]

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Hz – hertz (unidade de medida)

I – Intensidade sonora [W/m²]

I_0 – Intensidade sonora de referência [W/m²]

K13 – Massa porosa projetada

L_A – Nível sonoro, ponderado com filtro A [dB]

L_{eq} – Nível de pressão sonora contínuo equivalente [dB]

L_I – Nível de intensidade sonora [dB]

L_N – Nível de pressão sonora que num dado intervalo de tempo é excedido em N % [dB]

L_p – Nível de pressão sonora [dB]

L_{soma} – Adição de níveis de pressão sonora [dB]

L_w – Nível de potência sonora [dB]

m – Massa superficial do material [kg/m^2]

m' – Coeficiente de atenuação devido às condições climáticas da sala [m^{-1}]

NRC – *Noise reduction coefficient* (Coeficiente de Redução de Ruído)

p – Pressão sonora [Pa]

Pa – Pascal (unidade de medida)

P_{at} – Pressão atmosférica normal [$\approx 10^5$ Pa]

p_o – Pressão sonora de referência [2×10^{-5} Pa]

p_{ef} – Pressão eficaz [Pa]

r – Distância [m]

R1 – Câmara reverberante do Laboratório de Acústica da FEUP

RMS – *Root mean square* (unidade de medida)

S – Superfície real do material [m^2]

S.T.I.E.R. – Sociedade Técnica de Isolamentos e Energias Renováveis

T – Temperatura [K]

T – Tempo de reverberação [s]

T_1 – Tempos médios de reverberação da sala em cada banda de frequência sem provete [s]

T_2 – Tempos médios de reverberação da sala em cada banda de frequência com provete [s]

T_{20} – Tempo de reverberação determinado por um decaimento de 20 dB [s]

T_{30} – Tempo de reverberação determinado por um decaimento de 30 dB [s]

V – Volume [m^3]

W – Potência sonora [W]

W_o – Potência sonora de referência [W]

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

Historicamente, o estudo da Acústica de Edifícios nasceu no início do século XX com o físico americano Wallace Clement Sabine, apesar de muitos séculos anteriormente (século I a.C.), já tenha existido um arquiteto romano Vitruvius que se dedicou à elaboração de regras empíricas de como construir anfiteatros para a obtenção de uma propagação do som adequada para os ouvintes presentes [1].

As primeiras preocupações relativamente a Acústica de Edifícios foram sobretudo a geometria dos anfiteatros, proporcionando uma maior propagação do som permitindo assim, que todos os espetadores da sala conseguissem ouvir e perceber o que estava a ser transmitido. A evolução lógica que ocorreu de seguida foi relativamente aos materiais usados nessas salas, a implantação de cortinas e panos, por exemplo, que resultaram num comportamento acústico melhorado das salas de espetáculo.

Podem assim, ser considerados esses materiais e sistemas, usados antigamente, os primórdios dos mecanismos modernos usados na Acústica de Edifícios.

Existem, portanto, duas perspetivas importantes nesta área [1]:

- *Correção Acústica* que se refere a corrigir um compartimento para o som emitido no mesmo (situação de interesse para este documento);
- *Isolamento Sonoro* que se referem corrigir um certo espaço que transmite ou recebe sons para locais contíguos.

Existem três categorias distintas de materiais e sistemas absorventes sonoros, que podem ser agrupados consoante as características de cada um [1]:

- *Porosos e fibrosos (texturados)*, eficazes a absorver frequências altas;
- *Ressoadores*, eficazes a absorver frequências médias;
- *Membranas*, eficazes a absorver frequências baixas.

O foco desta dissertação situa-se num sistema absorvente sonoro poroso de absorção sonora, que deve a sua eficiência à capacidade de dissipar energia através dos poros superficiais. Esta característica pode ser gravemente prejudicada caso os poros forem preenchidos com a pintura dos mesmos ou com a sujidade, por exemplo.

O objetivo deste documento é, portanto, estudar o efeito do uso e da pintura num sistema absorvente sonoro.

Para a concretização deste estudo serão realizados ensaios em câmara reverberante, com o objetivo de determinar os valores do coeficiente de absorção sonora (α) num sistema absorvente sonoro após anos de utilização assim como avaliar o posterior efeito da pintura no mesmo. Os resultados obtidos permitirão estabelecer uma relação entre os anos de utilização dos sistemas absorventes sonoros assim como o efeito da pintura na variação do coeficiente (α), assim como, avaliar o papel da manutenção destes sistemas e encontrar um compromisso entre a qualidade acústica de um determinado espaço e um *design interior* agradável.

1.2. ESTRUTURA

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, o primeiro capítulo “Introdução” sendo o presente, tem como objetivo um pequeno enquadramento e objetivos do documento, assim como a explicação da estrutura do mesmo.

O segundo capítulo, “Conceitos e Definições”, procura educar o leitor para a compreensão da dissertação nos capítulos subsequentes, apresentando os conceitos base necessários para acompanhar o desenvolvimento do documento.

O terceiro capítulo, “Estado da Arte”, contextualiza a evolução histórica do tema, assim como a introdução de conhecimento já desenvolvido sobre o assunto, nomeadamente estudos efetuados sobre o efeito de pinturas em revestimentos de absorção sonora.

O quarto capítulo, “Ensaio Experimentais”, identifica a metodologia usada nos ensaios que foram efetuados, realçando os pontos mais importantes na realização dos mesmos, assim como a caracterização das amostras usadas.

O quinto capítulo, “Resultados”, é reservado somente para apresentar e comparar os resultados obtidos nos ensaios efetuados.

Finalmente, o sexto capítulo, “Conclusão”, expõe as conclusões retiradas da análise dos resultados dos ensaios, deixando também algumas considerações finais para um possível aprofundamento futuro do tema.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. INTRODUÇÃO

No decorrer deste capítulo, serão explicados vários conceitos e definições necessários para o adequado entendimento deste documento, com o objetivo de que qualquer leitor, conhecedor ou não do assunto, consiga perceber os objetivos assim como os resultados obtidos nesta dissertação.

2.2. PRINCÍPIOS BÁSICOS

2.2.1. SOM E RUÍDO

O “Som” não é mais do que uma sensação no cérebro devida à captação, pelo sistema auditivo, de alterações de pressão que se propagam num meio elástico (ar, água, materiais de construção, etc.), consistindo em ondas de compressão seguidas de dilatação ou rarefação (Figura 2.1) [1].

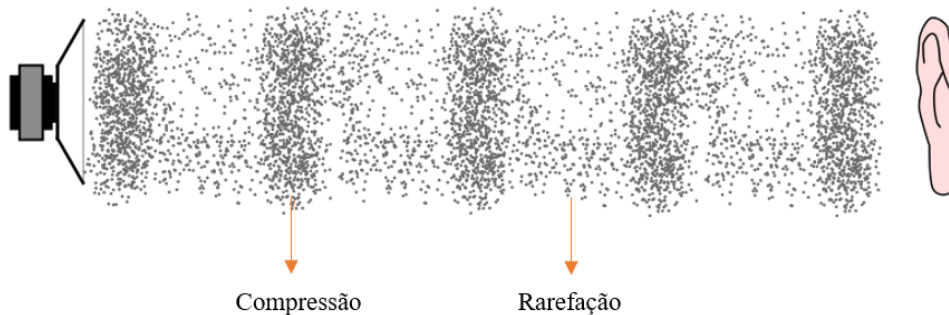


Figura 2.1 – Exemplo de propagação de uma onda sonora (adaptado de [2]).

Estas alterações de pressão podem ser distinguidas em dois tipos:

- SOM, o que é agradável ou com significado para o ouvinte;
- RUÍDO, o que é desagradável ou sem significado para o ouvinte.

O que é *som* para alguns pode ser considerado *ruído* para outros simultaneamente, dependendo apenas de como o ouvinte interpreta a informação.

O estudo dos sons ou dos ruídos nas situações práticas mais correntes, pode ser chamado de forma simplista, de “acústica”. Este estudo é feito segundo três domínios de análise distintos (mas complementares) [1]:

- Pressão;
- Frequência;
- Tempo.

Limitando o presente estudo apenas à análise da propagação do som no ar, pode-se verificar que o mesmo viaja sob a forma de ondas esféricas concêntricas tendo a fonte sonora como centro. A origem do som pode ser vista como se fosse uma *esfera pulsante* que excita as moléculas circundantes [1].

Um exemplo prático para a compreensão deste fenómeno, pode ser observado facilmente atirando uma pedra a uma zona de água estacionária. As ondas concêntricas a partir do ponto de embate representam analogicamente as variações de pressão no ar produzindo ondas, mas agora tridimensionais no espaço (Figura 2.2) [1].

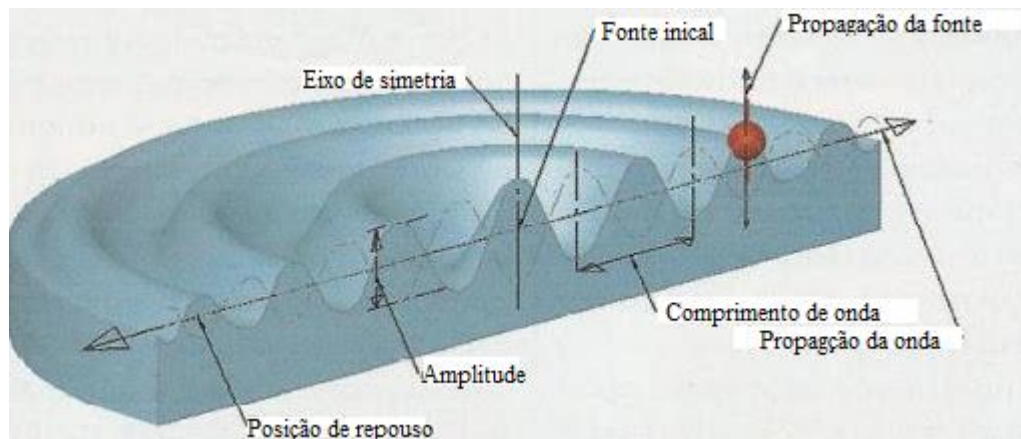


Figura 2.2 – Analogia de propagação de onda sonora (adaptado de [3]).

Um estímulo sonoro trata-se de uma vibração num meio elástico (no ar traduz-se por uma variação de pressão) que, uma vez estimulado (por cordas vocais, diapásio, diafragma de um altifalante, etc.) transmite esse estímulo às moléculas (ou partículas) adjacentes até chegarem ao ouvido. Criam-se assim zonas de compressão e de rarefação que se propagam no espaço. Se o resultado dessa vibração no cérebro for agradável ou tiver significado auditivo haverá *Som* se não tiver significado auditivo ou for desagradável existe *Ruído* [1].

2.2.2. PRESSÃO SONORA

2.2.2.1. Variação de Pressão

O parâmetro mais importante a ser medido nas ondas sonoras, é a variação de pressão provocada pelas mesmas. Esta variação tem sempre tomada como referência a pressão atmosférica normal (P_{at}) que, na Terra é de aproximadamente 101.400 Pa ($\approx 10^5$ Pa). A muito pequena variação em torno da P_{at} que os ouvidos conseguem captar, mesmo que muito intenso (avião) não varia mais do que 10 Pa [1].

A velocidade de propagação das ondas sonoras ou celeridade (c) (propagação da variação de pressão) no ar varia com a temperatura de acordo com a expressão (2.1) e apenas é válida para ar seco e ao nível do mar [1]:

$$c = 20,045\sqrt{T} \quad (2.1)$$

Sendo,

c – celeridade (m/s);

T – temperatura em kelvin (K), $T(K) = 273,15 + \theta$ ($^{\circ}C$);

θ – temperatura do ar ($^{\circ}C$).

Por exemplo, a $20^{\circ}C$, $c = 343$ m/s.

2.2.2.2. Intensidade e Potência Sonora

Adicionalmente à pressão existem outras grandezas importantes para a análise da propagação sonora tais como a potência sonora e a intensidade sonora (Figura 2.3).

Analisando individualmente estas grandezas, a intensidade sonora (I) é, numa dada direção, a quantidade média de energia que atravessa por segundo uma área de 1 m^2 , normal a mesma direção e é expressa em W/m^2 . Assim, é possível avaliar a componente direcional do som, representando-se assim, por uma grandeza vetorial e não escalar contrariamente a pressão sonora [1].

A potência sonora (W) é uma grandeza característica da fonte sonora e não do estímulo criado pela mesma fonte num dado ponto ou direção tal como a intensidade e a pressão. Quantifica-se como sendo a energia total que num segundo atravessa uma esfera fictícia de raio qualquer centrada na fonte e expressa-se em W [3].

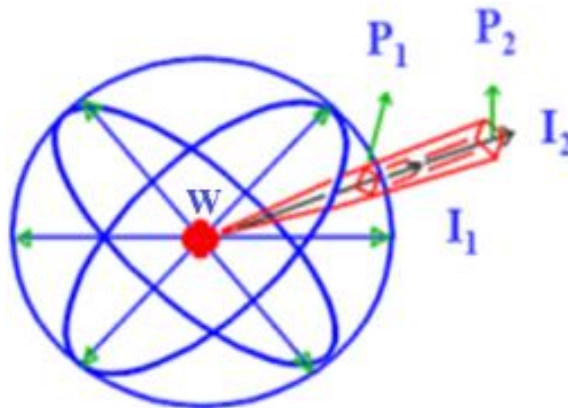


Figura 2.3 – Inter-relação entre potência (W), pressão (p) e intensidade (I) (adaptado de [3]).

Estas três grandezas (I , W e p) estão relacionadas entre si pela seguinte expressão:

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

Onde,

I – intensidade sonora (W/m^2);

W – potência sonora (W);

r – distância (m);

p – pressão sonora (Pa);

ρ – massa volúmica (ar) $\approx 1,2\text{ kg/m}^3$;

c – celeridade (m/s) ≈ 340 m/s.

2.2.2.3. Níveis

A unidade de grandeza que avalia a variação de pressão é o *decibel* (dB), que é 1/10 do *bel*. A caracterização desta unidade é avaliada através de uma escala logarítmica, visto que o ouvido não responde de forma linear aos estímulos sonoros. Por essa razão, não se usa o *pascal* para avaliar a variação de pressão [1].

Um ser humano jovem sem problemas de audição consegue ouvir valores mínimos de variação de pressão até 10^{-5} Pa, o que corresponde o *limiar da audição*. Na outra ponta da gama, o mesmo ser humano consegue ouvir um valor máximo de variação de pressão de até 100 Pa, ao que corresponde o *limiar da dor*. Sendo assim, a gama de audibilidade humana no domínio da pressão é de 10^7 [1].

Convertendo pressões (p) para níveis de pressão sonora (L_p) (Figura 2.4), usa-se a expressão seguinte de acordo com a norma portuguesa NP 1730:1996 [4]:

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} \quad (dB) \quad (2.3)$$

Sendo a pressão sonora de referência, (p_0) = 2×10^{-5} Pa.

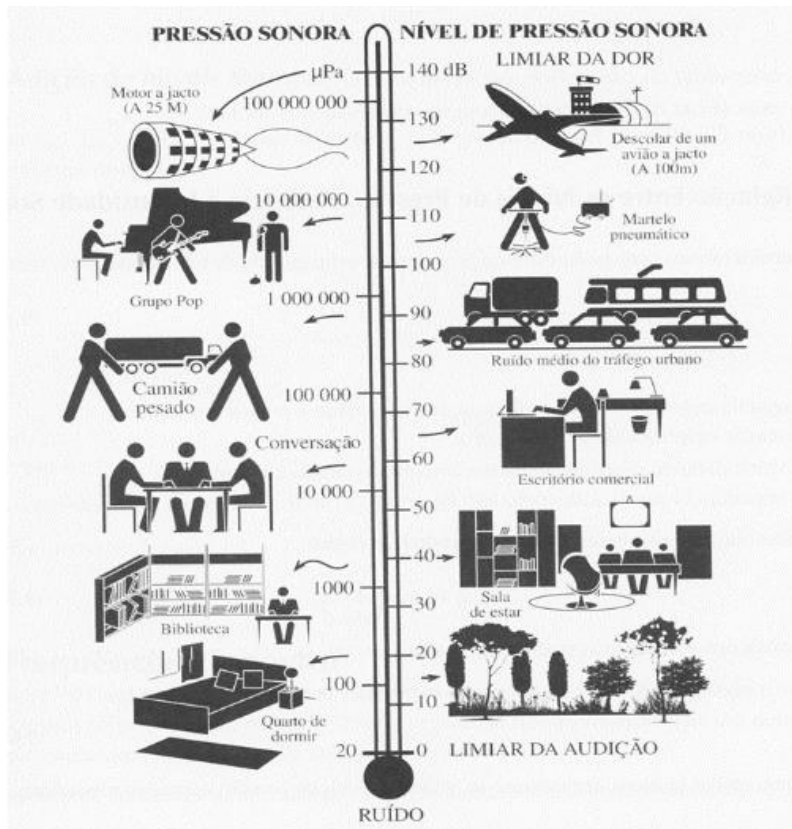


Figura 2.4 – Pressão sonora p e níveis de pressão sonora L_p (adaptado de [4]).

Existem outras grandezas medidas em dB, como é o caso dos níveis de intensidade sonora (L_I):

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}, \text{ com } I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad (2.4)$$

Assim como os níveis de potência sonora (L_W):

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0}, \text{ com } W_0 = 10^{-12} \text{ W} \quad (2.5)$$

A diferença de valores entre L_I e L_W é praticamente desprezada, sendo que o erro associado é inferior a 0,2 dB [1].

Quando existem várias fontes sonoras (caso mais comum no cotidiano), a adição de níveis sonoros traduz-se não de forma algébrica, mas sim de forma logarítmica [1], resultando na seguinte expressão:

$$L_{soma} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (2.6)$$

2.2.2.4. Pressão eficaz

A pressão tem variações temporais consideráveis, o que torna estas variáveis importantes para acústica. As medições dessas variáveis são usualmente determinadas pela medição de valores *eficazes* ou RMS (*root mean square*) [1].

Assim, a *pressão eficaz* é determinada com a seguinte expressão:

$$p_{ef}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt \quad (2.7)$$

Nos sons puros, a pressão eficaz e a pressão máxima estão interligadas da seguinte forma:

$$p_{ef} = \frac{P_{máxima}}{\sqrt{2}} \approx 0,71 P_{máxima} \quad (2.8)$$

2.2.3. FREQUÊNCIA

2.2.3.1. Definição

A frequência é um dos parâmetros mais importantes para caracterizar um sinal sonoro. Praticamente todos os sons são distinguíveis entre eles devido à variação de frequência que os mesmos emitem (Figura 2.5) [4].

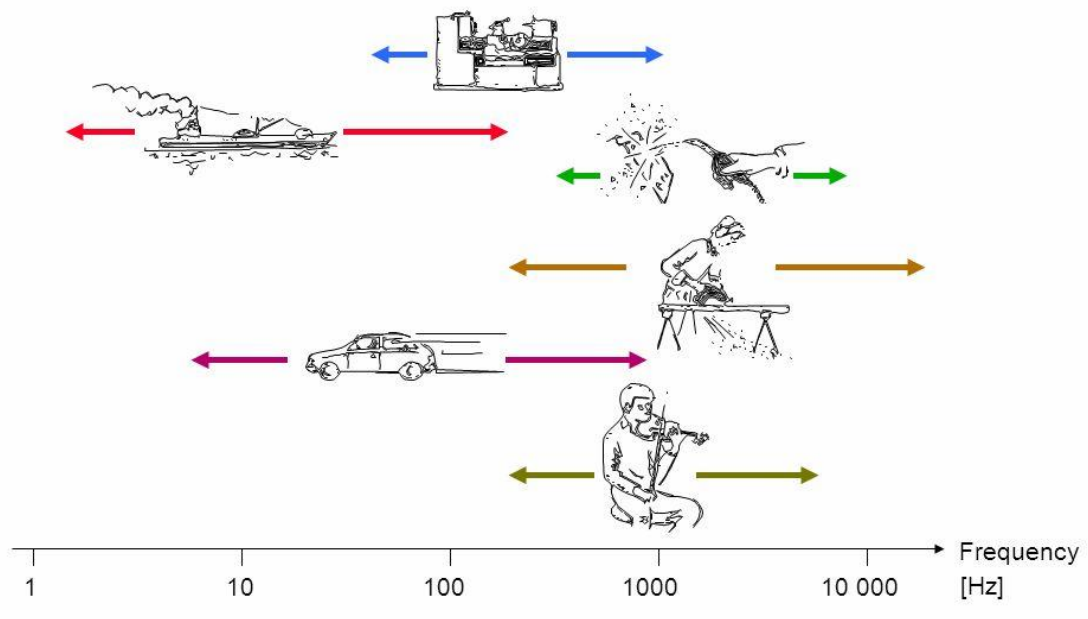


Figura 2.5 – Exemplos práticos de gamas de frequências [1].

A frequência representa a taxa de ocorrência das flutuações completas de pressão por segundo, por outras palavras, o número de ciclos completos por segundo. A medida da frequência é realizada em *hertz* (Hz) [1].

No domínio da Acústica de Edifícios, é usual dividir o espectro das frequências em três grandes zonas:

- Frequências graves: 20 a 355 Hz;
- Frequências médias: 355 a 1410 Hz;
- Frequências agudas: 1410 a 20000 Hz.

As três grandes zonas caracterizadas acima apenas cobrem a gama de frequências que os seres humanos conseguem de facto ouvir (quando jovens e de audição normal), cobrindo assim as frequências entre os 20 Hz e os 20 kHz. Existem, no entanto, gamas de frequências inferiores ao limiar da audição, denominadas como *infrassons* e outra zona superior aos 20 kHz denominada por *ultrassons* (Figura 2.6) [1].

Apesar dos seres humanos conseguirem distinguir vários sons na gama de frequência audível não conseguem distinguir pequenas variações de frequência. A capacidade de discriminar essas variações dependem fortemente do valor da frequência. Na gama dos 125 Hz, por exemplo, conseguem identificar variações de cerca de 0,5 Hz em contraste com frequências na ordem dos 8 kHz onde tal discriminação só é expectável para variações mínimas de 60 Hz [1].

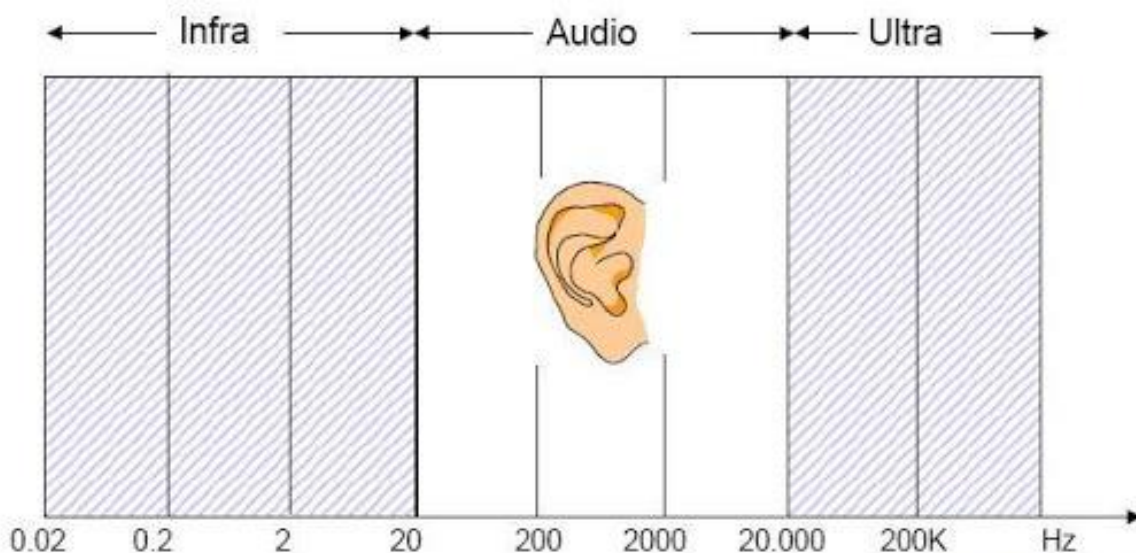


Figura 2.6 – Gama de frequências (humanos) (adaptado de [5]).

Os sons resumidamente podem ser distinguidos em sons puros e sons complexos através da frequência dos mesmos. O *Som Puro* é associado a uma única componente em termos de frequência, em contraste com o *Som Complexo* que resulta da sobreposição de vários sons puros, que é o mais corrente no quotidiano [1].

2.2.3.2. Bandas de Frequência

Seria imensamente trabalhoso analisar as frequências de forma detalhada individualmente devido à existência das centenas (ou milhares) delas. O mais corrente é analisar as frequências por agrupamentos “bandas” de frequências correspondentes a intervalos de frequência de certa dimensão normalizada. Uma “banda” corresponde a um intervalo de frequências entre um limite inferior (f_1) e um limite superior (f_2) [1]. A frequência central é definida pelo valor médio (f_0):

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \quad (2.9)$$

A diferença numérica entre o limite superior e inferior é denominado por largura de banda (B). Na Acústica de Edifícios são exclusivamente usadas as bandas de frequências de largura de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava (Figura 2.7) [1]. A expressão que traduz a largura de banda (B) é dada por:

$$B = f_2 - f_1 = \frac{2^K - 1}{\sqrt{2^K}} f_0 \quad (2.10)$$

Sendo $K = 1$ ou $1/3$ se for banda de 1/1 oitava ou de 1/3 de oitava.

Os seus limites inferiores (f_1) e superiores (f_2) são obtidos de forma exata pela expressão:

$$f_1 = f_0 2^{-K/2} \quad \text{e} \quad f_2 = f_0 2^{K/2} \quad (2.11)$$

Sendo $K = 1$ ou $1/3$ se for banda de 1/1 oitava ou de 1/3 de oitava.

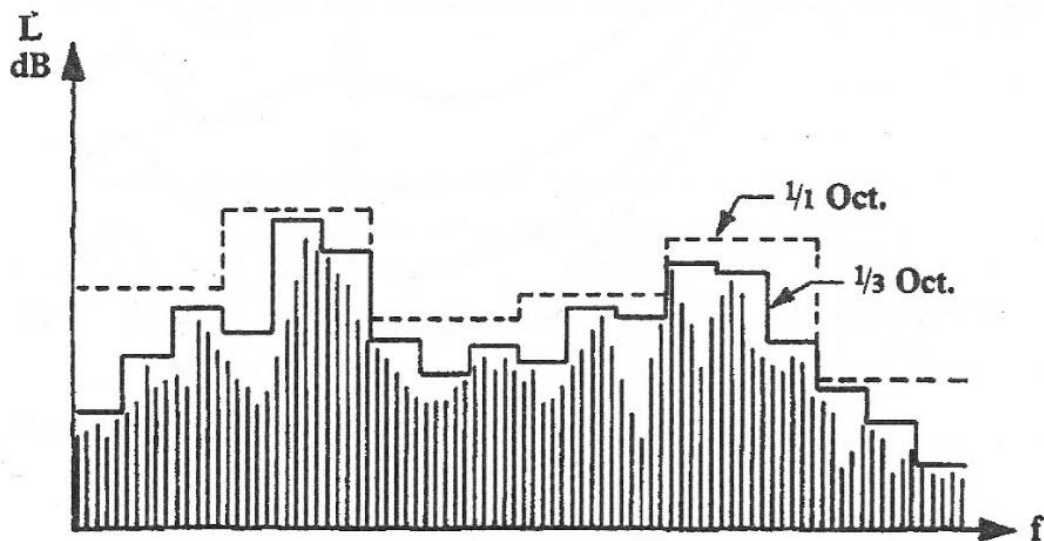


Figura 2.7 – Exemplo de espectros sonoros de um mesmo ruído em bandas de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava [1].

2.2.3.3. Curvas de Ponderação

O ouvido humano não interpreta as pressões sonoras da mesma forma que os microfones (e outros equipamentos em geral), os quais conseguem registrar com total fidelidade qualquer que seja a frequência emitida. Os seres humanos interpretam a informação dando mais ou menos ênfase a certas frequências do espectro sonoro, tendo uma sensibilidade muito mais apurada para frequências na ordem dos 2300 aos 2800 Hz e muito pouca sensibilidade para frequências baixas (inferiores a 125 Hz) [1].

Devido a esta singularidade dos seres humanos surgiram as curvas de igual percepção subjetiva da intensidade sonora que são escalonadas pela unidade denominada *fone* [1].

De modo a combater esta preferência dada pelo ouvido humano foram introduzidos filtros eletrônicos nos aparelhos de medição para se “assemelharem” ao ser humano. Criaram-se assim, as chamadas curvas de ponderação, para efetuar as correções necessárias em função da frequência [1].

A curva de ponderação “A” tem como característica a atenuação dos sons graves, dando origem a um maior ganho para a faixa de frequências de 2 a 5 kHz e voltando a atenuar sons acima desta faixa [6]. De entre os vários filtros existentes (Figura 2.8), o mais usado na atualidade é o filtro A, pois, assemelha-se mais ao ouvido humano. O resultado obtido desta transformação (*nível sonoro* e não *nível de pressão sonora*) no caso de se tratar do filtro A é expresso em dB(A) ou $L_A = \dots \text{dB}$ [1].

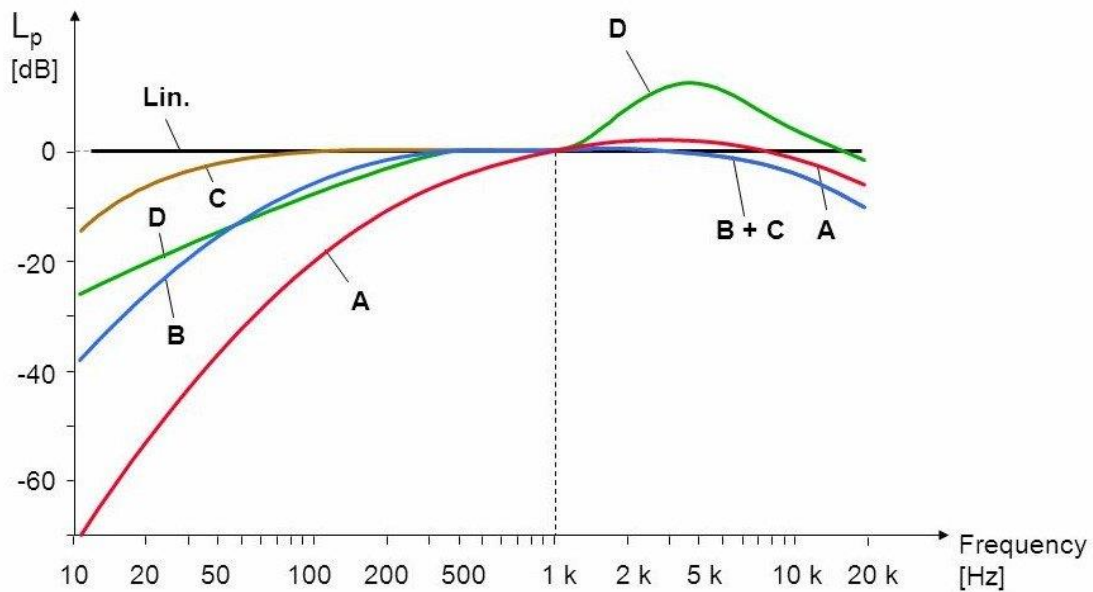


Figura 2.8 – Descrição das curvas de ponderação (filtros) A, B, C e D (adaptado de [6]).

2.2.4. ANÁLISE NO TEMPO

Outro conceito importante é a duração de qualquer ruído. Existem ruídos de curta duração (disparos, faíscas, etc.) e outros de longa duração (quedas de água, etc.) [1].

Para poder caracterizar o acontecimento sonoro recorre-se a um parâmetro descritor *energético* chamado de “nível de pressão sonora contínuo equivalente” L_{eq} , que é definido como sendo o nível que se atuasse constantemente num dado intervalo de tempo, “produziria” a mesma energia que o som avaliado [1]. A fórmula que traduz este acontecimento é dada por:

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \quad (2.12)$$

Outro parâmetro de medida do ruído também usado no domínio do tempo é o L_N . Estes parâmetros *estatísticos* estão associados a quantis de densidade de probabilidade, sendo o nível que num dado intervalo de tempo é excedido em $N\%$ da duração temporal do intervalo em causa [1].

2.3. ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS

2.3.1. ABSORÇÃO SONORA

2.3.1.1. Definições

Certos materiais possuem a capacidade de transformar parte da energia sonora que sobre eles incidem numa diferente modalidade de energia (geralmente térmica), esta propriedade é denominada por absorção sonora (Figura 2.9). A relação que existe entre a quantidade de energia sonora que é absorvida pelo material e aquela que sobre ele incide, é chamada de *coeficiente de absorção sonora* (α) [1], é traduzida pela seguinte expressão:

$$\alpha = \frac{E \text{ absorvida}}{E \text{ incidente}} \quad (2.13)$$

O coeficiente de absorção sonora pode variar entre 0 e 1. Um material que possui um coeficiente de absorção sonora igual a 0,20, significa que absorve 20% da energia incidida sobre ele. Materiais muito refletores possuem uma absorção sonora praticamente igual a zero enquanto, materiais ditos “absorventes” apresentam um α maior a 0,5 [1].

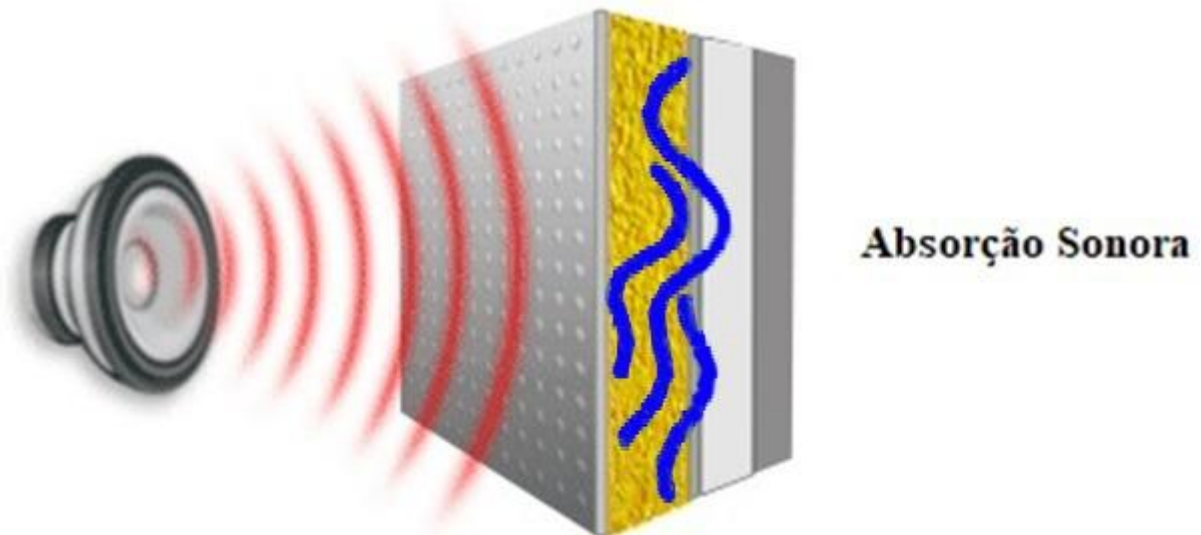


Figura 2.9 – Processo de absorção sonora (adaptado de [7]).

O coeficiente de absorção sonora para um dado material varia com a frequência do som incidente e com o ângulo de incidência. Existem valores tabelados de α em função da frequência para diversos materiais e sistemas (Quadro 2.1 apresenta um exemplo) [1].

É muito comum aparecer também o parâmetro *NRC* (*noise reduction coefficient*), que é definido como sendo a média aritmética dos valores de α nas bandas de oitava dos 250 aos 2000 Hz (é apresentado arredondado para o múltiplo mais próximo de 0,05) [1]:

$$NRC = \frac{(\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000})}{4} \quad (2.14)$$

É importante salientar a existência de um outro parâmetro “médio” chamado α_w que é obtido através dum ajuste ponderado numa curva de referência usando bandas de oitava dos 250 aos 4000 Hz. Traça-se a curva dos valores de α por banda e determina-se a soma dos desvios positivos entre uma curva de referência móvel e os valores reais. O valor α_w é o valor lido para os 500 Hz na curva ajustada de modo

que a soma dos desvios positivos seja a mais elevada possível sem ultrapassar os 0,10 (múltiplos de 0,05). Sempre que o coeficiente de absorção sonora medido excede o do valor de referência de 0,25 ou mais, acrescenta-se uma letra “indicadora de forma” entre parêntesis (*L-M-H* consoante acontecer nos 250-500/1k-2k/4k Hz) [1].

Esta norma também refere a atribuição de classes de absorção sonora: *A* ($\alpha_w \geq 0,90$), *B* ($0,80 \leq \alpha_w \leq 0,85$), *C* ($0,60 \leq \alpha_w \leq 0,75$), *D* ($0,30 \leq \alpha_w \leq 0,55$), *E* ($0,15 \leq \alpha_w \leq 0,25$) e *não classificado* ($\alpha_w \leq 0,10$).

Quadro 2.1 – Valores de coeficientes de absorção sonora (α) de alguns materiais ou sistemas (adaptado de [1]).

Frequência (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
Argamassa	0,14	0,10	0,06	0,05	0,04	0,03
Gesso cartonado, 2 placas (32 mm)	0,28	0,12	0,10	0,17	0,13	0,09
Madeira com caixa de ar de 25 mm	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05
Painéis de contraplacado fino	0,42	0,21	0,10	0,08	0,06	0,06
Blocos de betão com acabamento liso	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05
Vidro espesso	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Pavimento em betão	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Pavimento de betão armado revestido com mosaico ou mármore	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Teto de betão rebocado e estucado	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05
Linóleo sobre betão	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Soalho (<i>parquet</i>) de madeira sobre betão	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Soalho sobre vigas de madeira com caixa de ar	0,15	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10
Alcatifa densa colada sobre betão	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65
Alcatifa densa colada com base de borracha	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73
Alcatifa leve colada sobre betão	0,02	0,04	0,08	0,20	0,35	0,40
Cortina leve	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortina pesada	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65

2.3.1.2. Determinação do Coeficiente de Absorção Sonora

A determinação do coeficiente de absorção sonora pode ser realizada através de dois métodos normalizados distintos:

- Método do tubo de ondas estacionárias (tubo de Kundt);
- Método da câmara reverberante.

O método do tubo de ondas estacionárias consiste num tubo metálico onde numa das extremidades é colocada a amostra a testar e na outra ponta do tubo existe um pequeno altifalante com um pequeno orifício, perfurado no meio do seu magneto, para deixar passar uma pequena vareta metálica ligada a um microfone que desliza sobre rodas num recipiente (Figura 2.10). O altifalante estando a funcionar

cria, ondas estacionárias devido à interação da onda incidente com a onda refletida na amostra. Esta onda estacionária permite obter a absorção sonora do material em estudo [1].



Figura 2.10 – Tubo de ondas estacionárias [foto do autor].

O segundo método é o mais importante para este documento, visto que vai ser o método utilizado para a determinação do coeficiente de absorção sonora nos ensaios laboratoriais realizados. O método da câmara reverberante é bem mais eficaz do que o método do tubo de ondas estacionárias, pois neste o α obtido apenas se traduz para uma incidência perpendicular das ondas sonoras, enquanto no segundo, o som atinge a amostra de todos os ângulos (campo difuso) tornando assim este mais realista [1].

Ao contrário do tubo de Kundt que apenas necessita de uma amostra circular com 5 cm de raio, para a realização deste ensaio em câmara reverberante é necessária uma amostra bastante com 10 a 12 m².

A câmara reverberante é um grande espaço em que todas as suas superfícies envolventes são refletoras ($\alpha \approx 0$). Esta característica da sala, torna o seu tempo de reverberação imensamente longo (sobretudo nas frequências baixas) (Figura 2.11). A realização do ensaio é efetuada pela colocação do material a ser testado no solo da sala, de seguida é medido o tempo de reverberação. Depois de comparar o resultado obtido com o mesmo da sala vazia, é alcançado através da fórmula de Sabine o α do material estudado para cada banda de frequências [1].

É muito usual aos valores obtidos usar-se o índice s de Sabine (α_s). Uma particularidade deste método é que só é válido se o campo sonoro da sala for suficientemente difuso [1].

Por vezes neste ensaio são obtidos valores de α superiores a 1,0 o que é fisicamente impossível. Este facto acontece devido à difração do som nos bordos da amostra [1].

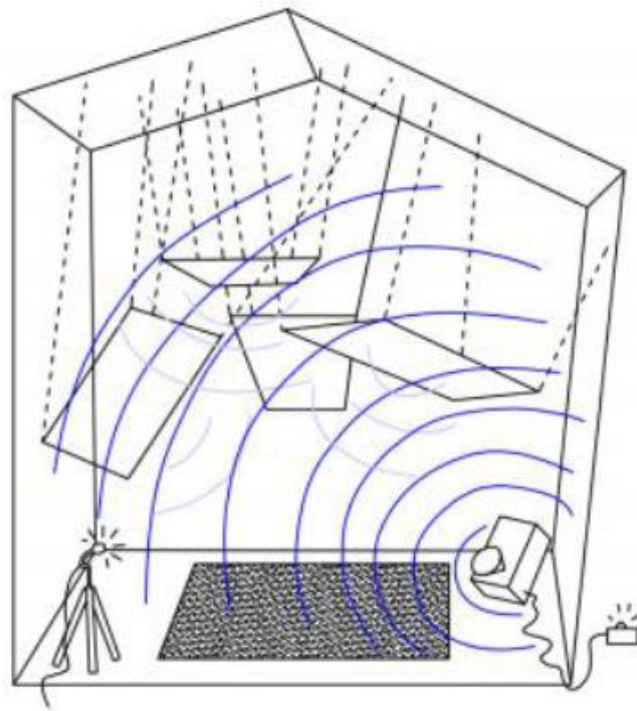


Figura 2.11 – Determinação do α em câmara reverberante (amostra sobre o pavimento) [1].

2.3.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

2.3.2.1. Definição e Conceitos

As ondas sonoras emitidas por uma fonte sonora dentro de um espaço fechado podem ser de origem *direta* ou *refletida*. As de origem direta viajam em linha reta desde a fonte sonora até ao recetor e as de origem refletidas só atingem o recetor depois de uma ou mais reflexões pela sala (Figura 2.12) [8].

Cada onda de origem direta é acompanhada por uma série de ondas refletidas que chegam sucessivamente ao recetor. Conforme vão chegando ao ouvido do recetor vão se tornando cada vez mais fracas devido às absorções consecutivas que sofrem a cada reflexão na sala e também devido ao efeito de absorção do ar [1].

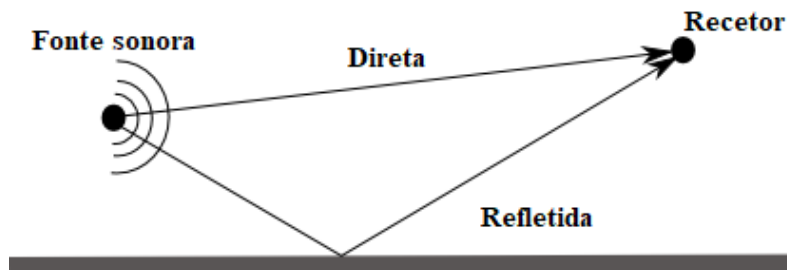


Figura 2.12 – Ondas sonoras de origem *direta* e *refletida* (adaptado de [9]).

O tempo de reverberação não é mais que o intervalo de tempo (em segundos) que um qualquer som demora a extinguir-se por completo, após múltiplas reflexões. Teoricamente é o tempo até que o nível de pressão sonora demora a decair 60 dB desde o momento em que a fonte deixa de emitir [8].

Difícilmente é possível atingir um decaimento de 60 dB num caso prático, pois o ruído de fundo irá sobrepor-se ao som emitido antes da “extinção” do mesmo. O mais prático é tentar obter um decaimento de apenas 30 dB (ou até 20 dB) e extrapolar o decaimento obtido (declive da reta) para se obter o tempo de reverberação. Assim sendo, o resultado obtido é expresso T_{30} (ou T_{20}) (Figura 2.13) [1].

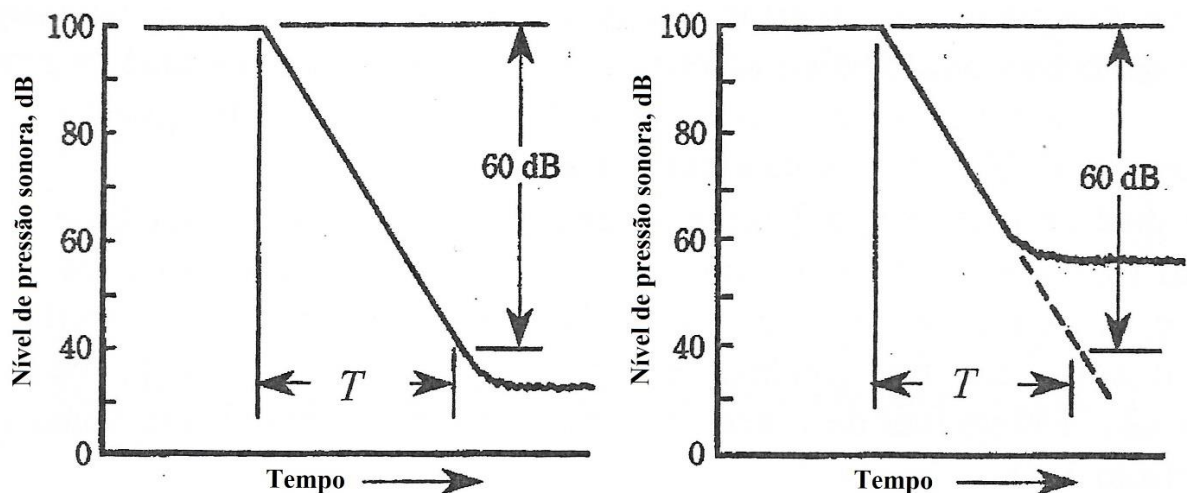


Figura 2.13 – Definição de Tempo de Reverberação T (valor teórico, esq. e obtido por extrapolação do declive, dir.) (adaptado de [1]).

2.3.2.2. Medição

Para proceder à medição do tempo de reverberação é necessário o uso de uma fonte sonora potente. A medição consiste no intervalo de tempo do decaimento do rasto sonoro após a cessação do ruído de teste. Os sistemas emissores usados têm de conseguir uma energia suficientemente forte em todo o espectro das frequências de interesse para o ensaio de forma assegurar um decaimento consideravelmente ampliado acima do ruído de fundo. As fontes sonoras geralmente usadas são [1]:

- Altifalantes (emitindo impulsos de banda estreita ou ruídos de largo espectro);
- Pistolas (pólvora seca).

2.3.2.3. Efeitos do Tempo de Reverberação

O tempo de reverberação é uma característica de um espaço [1]:

- Mascara os sons diretos (os sons refletidos sobrepõem-se aos sons diretos) o que se traduz num efeito negativo na maior parte dos cenários;
- Aumenta o nível sonoro (devido ao acréscimo provocado pelo som refletido ao som direto) o que geralmente se traduz num efeito favorável.

A inteligibilidade da palavra é o campo que mais sofre devido ao excessivo tempo de reverberação, o “rasto sonoro” característico da emissão das vogais passa a mascarar o baixo nível sonoro de emissão das consoantes e o seu curto período de duração.

Nem sempre um tempo de reverberação muito baixo é desejável, existem vários cenários onde um tempo de reverberação mais longo do que o das salas para palavras favorece, tal é o caso dos espaços dedicados a música, isto pois as peças musicais soam habitualmente melhor se existir um mínimo de reverberação de modo que as notas não sejam entendidas com uma excessiva clareza [1].

2.3.2.4. Fórmula de Previsão do Tempo de Reverberação

W.C. Sabine, em 1898, determinou a relação existente entre o Tempo de Reverberação, o Volume e a Absorção Sonora, esta famosa relação viria a ser conhecida por *Fórmula de Sabine*:

$$T = \frac{0,16 \cdot V}{A} \quad (2.15)$$

Sendo,

- T – Tempo de reverberação (s);
- V – Volume do compartimento (m^3);
- A – Absorção sonora equivalente (m^2),

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i \quad (2.16)$$

- α – coeficiente de absorção sonora do material (adimensional);
- S – superfície real do material (m^2).

Os valores obtidos através da aplicação da *Fórmula de Sabine* são muito aproximados da realidade para locais com campos sonoros difusos e com um coeficiente de absorção sonora média inferior a 0,20. A constante com o valor de 0,16 (s/m) pode ser calculada mais precisamente através da seguinte fórmula:

$$\frac{24 \cdot \ln 10}{c} \quad (2.17)$$

Sendo c a celeridade em m/s que depende da temperatura.

2.3.3. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS

2.3.3.1. Conceitos

Aprofundando agora mais o que foi introduzido no capítulo anterior sobre materiais e sistemas absorventes sonoros, eles podem ser agrupados em três categorias distintas consoante as características dos mesmos [1]:

- *Porosos e fibrosos*;
- *Ressoadores*;
- *Membranas*.

Esta distinção é realizada devido à eficácia de cada uma das categorias nas diferentes frequências do espectro sonoro. As membranas são mais eficazes nas frequências baixas do espectro, os ressoadores nas frequências médias e os materiais porosos nas frequências altas (Figura 2.14) [1].

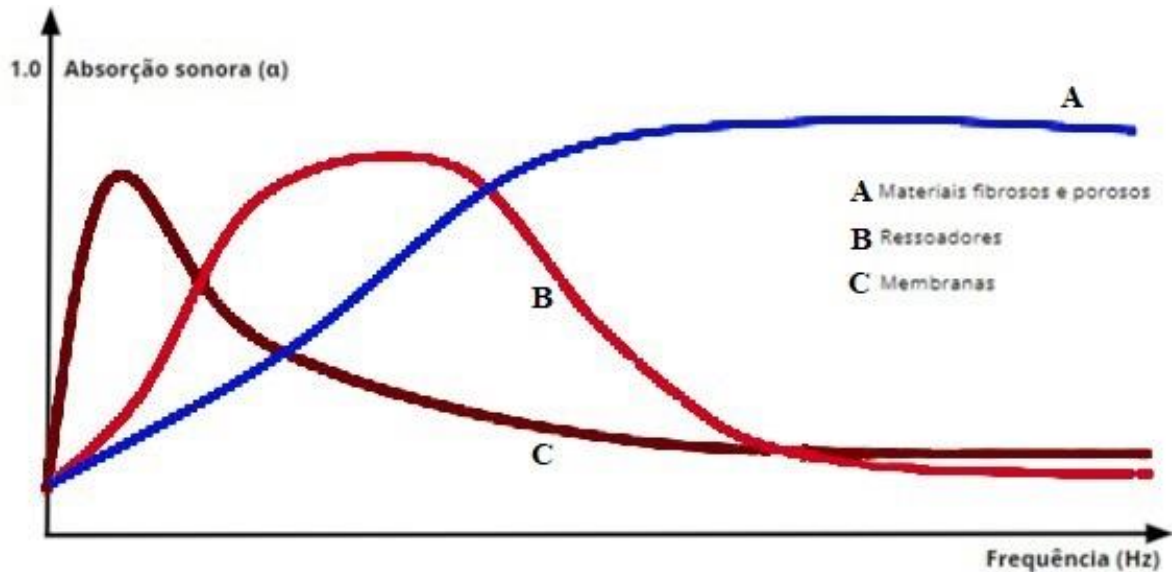


Figura 2.14 – Comportamento em frequência dos três tipos de materiais e sistemas absorventes sonoros (adaptado de [10]).

2.3.3.2. Materiais Porosos e Fibrosos

Os materiais porosos são o foco desta dissertação visto ser o tipo de materiais testados em câmara reverberante para a realização deste estudo.

Como referido anteriormente este tipo de materiais são mais eficazes nas frequências altas do espectro. Esta característica distinta deve-se ao facto de existir na composição dos mesmos poros e interstícios. As ondas sonoras incidindo neste tipo de materiais transferem parte da sua energia no movimento das fibras que resistem por fricção entre elas, transformando assim a energia sonora em energia térmica. Caso as fibras estejam muito afastadas e soltas haverá pouca perda de energia térmica. Contrariamente, se as fibras estiverem muito próximas e concentradas, não existirá penetração suficiente dentro do material, fazendo com que o movimento do ar não gerará fricção suficiente para a eficácia do mesmo. No meio-termo destes extremos existem, portanto, os bons materiais absorventes sonoros. A eficácia destes materiais depende fortemente da espessura e da densidade deles [1].

Estes materiais devem a sua eficiência à capacidade de dissiparem energia através dos seus minúsculos poros. Esta característica pode ser gravemente prejudicada caso os tais poros forem preenchidos com material (pinturas, sujidades, etc.), um dos focos desta dissertação é, portanto, avaliar este possível efeito negativo neste tipo de materiais.

A colocação excessiva deste tipo de materiais num certo local pode conduzir a um excesso de absorção sonora nas altas frequências, resultando numa remanescente importância excessiva nas frequências mais baixas, traduzindo-se dependendo do uso dado ao local num problema [1].

Os materiais porosos e fibrosos podem ser agrupados em diversos tipos consoante as suas características físicas:

- Tecidos e alcatifas;
- Massas porosas (para projeção);
- Aglomerados de fibras de madeira;
- Fibras minerais (mantas e painéis);
- Materiais plásticos;
- Aglomerados de cortiça.

Na Figura 2.15 é possível observar que os tecidos, na forma de cortinas e reposteiros, aumentam o seu comportamento acústico consoante o peso específico dos mesmos, do grau de franzido com que cobrem a superfície e da distância à parede, quanto mais pregas existir maior será a sua eficácia em toda a gama de frequências. As alcatifas para terem um bom comportamento absorvente dependem sobretudo da espessura do pêlo e do tipo de suporte, quanto maior a espessura, maior a eficácia nas altas frequências (Figura 2.15) [1].

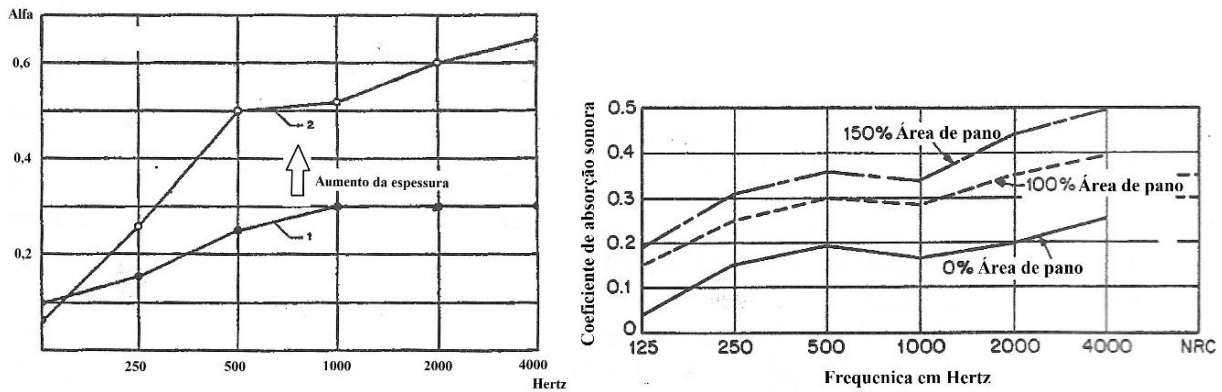


Figura 2.15 – Exemplos de coeficientes de absorção sonora para alcatifas (esq.) e reposteiros em função da área de pano usado (dir.) (adaptado de [1]).

As massas porosas para projeção que apresentam uma massa específica de $150 (\pm 15) \text{ kg/m}^3$ têm excelente comportamento acústico (Quadro 2.2).

Quadro 2.2 – Coeficientes de absorção sonora para massa porosa projetada (K13) aplicada sobre superfície rígida em diversas espessuras (** sobre caixa de ar) (adaptado de [1]).

mms	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	NRC
16mm	0,05	0,16	0,44	0,79	0,90	0,91	0,55
25mm	0,08	0,29	0,75	0,98	0,93	0,96	0,75
25mm**	0,47	0,90	1,10	1,03	1,05	1,03	1,00
38mm	0,15	0,51	0,95	1,06	0,99	0,98	0,90
51mm	0,26	0,68	1,05	1,10	1,03	0,98	0,95
63mm	0,41	0,84	1,05	1,07	1,02	0,99	1,00
76mm	0,57	0,99	1,04	1,03	1,00	1,00	1,00

Um exemplo dos coeficientes de absorção sonora para uma amostra de 38 mm de espessura de aglomerados de fibras de madeira pode ser observado na Figura 2.16 em duas situações distintas (com e sem caixa de ar).

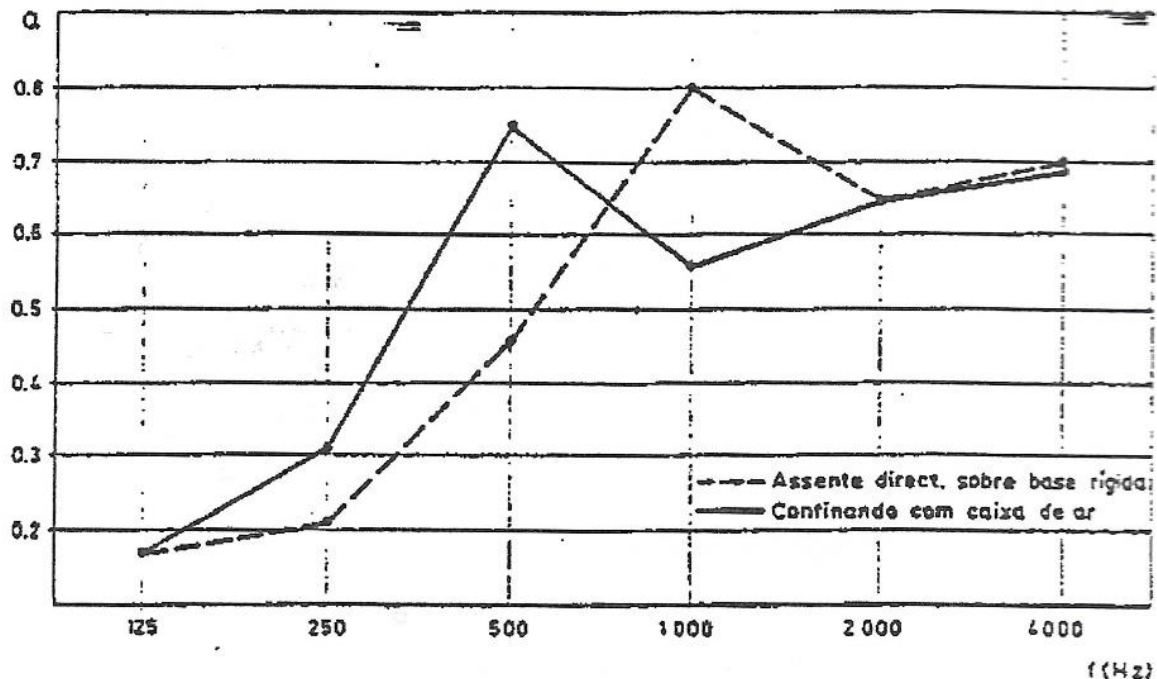


Figura 2.16 – Exemplos de coeficientes de absorção sonora para amostra com 38 mm de espessura de painéis de aparas de madeira [1].

As fibras minerais (lã de rocha, lã de vidro, etc.) aumentam a sua absorção sonora consoante a espessura, densidade e largura da caixa de ar existente [1].

Numa manta de lã de mineral, o aumento da espessura resulta num aumento da absorção sonora sobretudo nas frequências mais baixas (Figura 2.17 esq.), contudo esse aumento de espessura não se traduz num aumento proporcional da absorção sonora, conduzindo a ganhos cada vez menores [1].

Relativamente à massa volúmica do produto, esta afeta pouco a absorção sonora do material (entre 25 e 100 kg/m³) (Figura 2.17 centro). Fora desta gama de valores, ou as fibras estão tão densamente compactadas que a reflexão superficial é muito elevada e a penetração do som no material torna-se muito baixa ou as fibras estão demasiadas afastas que a absorção sonora se torna relativamente baixa [1].

A colocação do material com um certo espaçamento da parede melhora o comportamento acústico nas frequências mais baixas (Figura 2.17 dir.). Colocar uma caixa de ar de 75 mm de largura em lã de vidro com 25 mm de espessura traduz-se aproximadamente no mesmo efeito do que ter o dobro da espessura (50 mm) colocado diretamente sobre a parede [1].

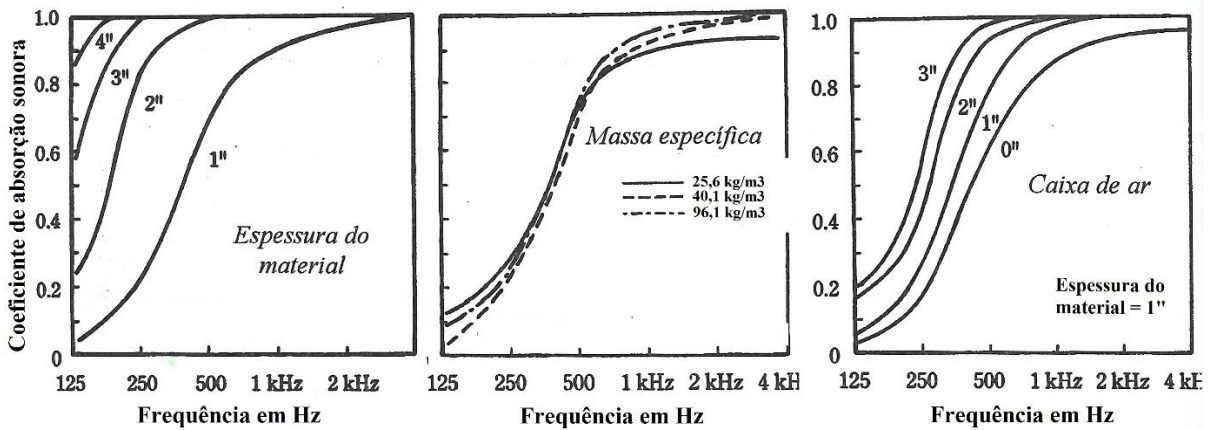


Figura 2.17 – Coeficientes de absorção sonora para painéis de material poroso (lã de vidro) em função da espessura (esq.), da massa específica (centro) e da largura da caixa de ar (dir.) (adaptado de [1]).

Vários tipos de materiais plásticos são por vezes usados para tratamento acústico, entre eles estão:

- Poliuretano expandido (35 kg/m³);
- Poliestireno expandido (20 kg/m³);
- Espumas flexíveis de poliuretano (30 kg/m³).

Os coeficientes sonoros destes materiais podem ser observados na Figura 2.18.

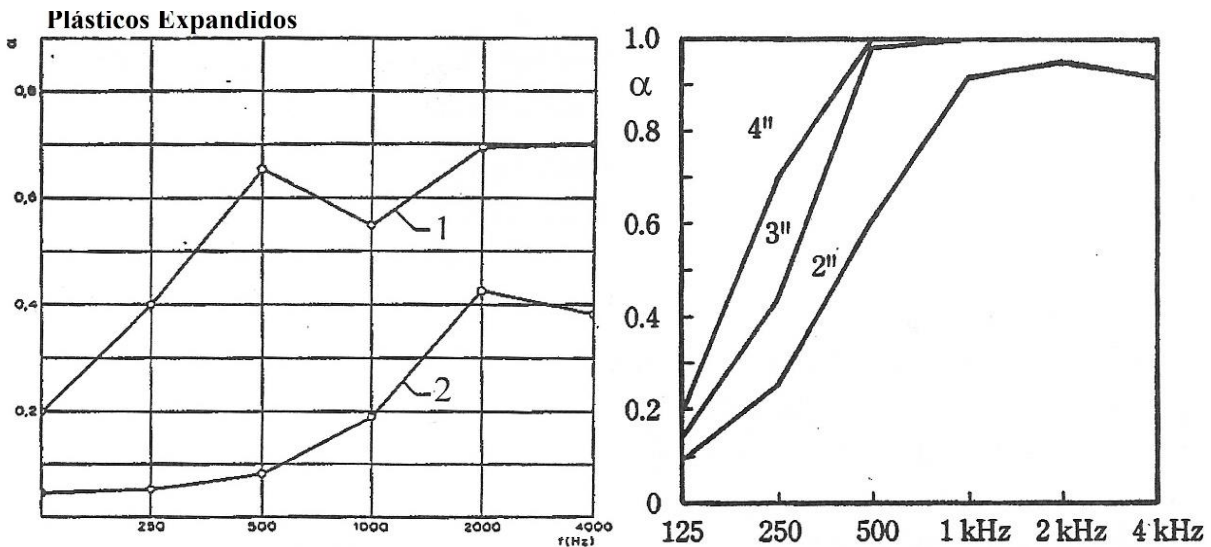


Figura 2.18 – Coeficientes de absorção sonora para painéis de material plásticos expandidos (1: poliuretano expandido, 50 mm espessura – 2: poliestireno expandido, 25 mm de espessura) (esq.) e espuma de poliuretano (Sonex) (50, 75 e 100mm) (dir.) (adaptado de [1]).

Os últimos materiais porosos analisados são os aglomerados de cortiça, entre estes existem dois tipos:

- Aglomerado negro (espessura entre 20 e 40 mm);
- Aglomerado composto de cortiça (espessura entre 3 e 6 mm).

Os coeficientes sonoros destes últimos podem ser analisados na Figura 2.19.

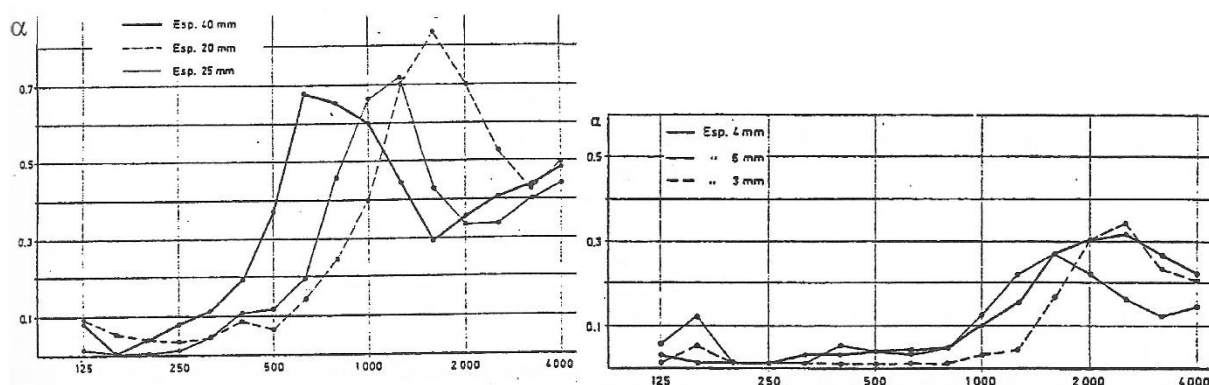


Figura 2.19 – Coeficientes de absorção sonora para painéis de aglomerado de cortiça (aglomerado negro de 20 a 40 mm de espessura à esq. e aglomerado compostos de 3 a 6 mm à dir.) (adaptado de [1]).

2.3.3.3. Ressonadores

Existem dois grupos de ressoadores:

- Ressonadores isolados;
- Ressonadores agrupados.

Os primeiros, também denominados por *ressonadores de cavidade*, são compostos por uma cavidade de paredes rígidas, existindo apenas uma única abertura nos mesmos. Estes materiais funcionam como um sistema mecânico massa/mola. O ar projetado contra a parede equipara-se à massa do sistema referido e o ar no interior da cavidade trabalha como a mola [9]. Este tipo de sistemas tem maior influência para atuar nas médias frequências. É possível obter a sua frequência de eficácia máxima através da expressão seguinte:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(l+1,6r)}} \quad (2.18)$$

Os ressoadores agrupados é a forma mais comum de usar este tipo de sistemas, funcionando da mesma forma que os ressoadores isolados. Podendo ser traduzidos pela expressão de cálculo:

$$f = \frac{10.c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{(e+1,6r)d}} \quad (2.19)$$

(validade: $f.d < 3400 \text{ Hz.cm}$)

Sendo: P – percentagem de área perfurada (%);
 r – raio de cada perfuração (cm);

e – espessura da placa perfurada (cm);
 d – largura da caixa de ar (cm).

2.3.3.4. Membranas

As *membranas* são usadas para atenuar frequências baixas. Este tipo de sistema absorve as ondas sonoras pela vibração de toda a sua estrutura que é constituída por grandes áreas de painéis de pequena espessura e através de perdas de calor por fricção nas suas fibras quando o material entre em flexão. Esta característica é válida devido ao sistema absorver e dissipar energia para a frequência que corresponde a frequência natural de vibração do mesmo [1]:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{m.d}} \approx \frac{60}{\sqrt{m.d}} \quad (2.20)$$

Sendo,

- ρ – massa volúmica do ar;
- m – massa superficial (kg/m^2);
- d – caixa de ar (m).

2.3.3.5. Colocação de Materiais Absorventes

Habitualmente a colocação de materiais absorventes sonoros é realizada para revestir os tetos ou paredes (com ou sem caixa de ar), mas existe outro método de colocação, os absorsores suspensos (*baffles*). Este tipo de sistemas trata-se de almofadas de grande dimensão (até 1 m^2) de materiais porosos e fibrosos que são suspensas no teto verticalmente (Figura 2.20). Esta técnica de colocação permite aumentar a área de absorção sonora visto que passa a atuar nas duas faces e também permite revestir o teto com materiais absorventes sonoros em adição a estes sistemas suspensos [1].

A aplicação de materiais absorventes numa sala não pode ser aleatória, caso sejam usados diversos tipos de materiais para conseguir uma boa eficácia tem de atuar nos três modos axiais (lados, topos e teto) do compartimento a revestir [1].

Em salas retangulares, a maneira mais eficaz de colocar materiais absorventes são junto aos cantos e ao longo dos bordos das superfícies. Em compartimentos com paredes altas, a eficácia do material é aumentada se colocado nas zonas mais baixas das paredes. Uma regra importante a reter, é nunca deixar superfícies não tratadas acusticamente em posição frontal uma, a outra [1].

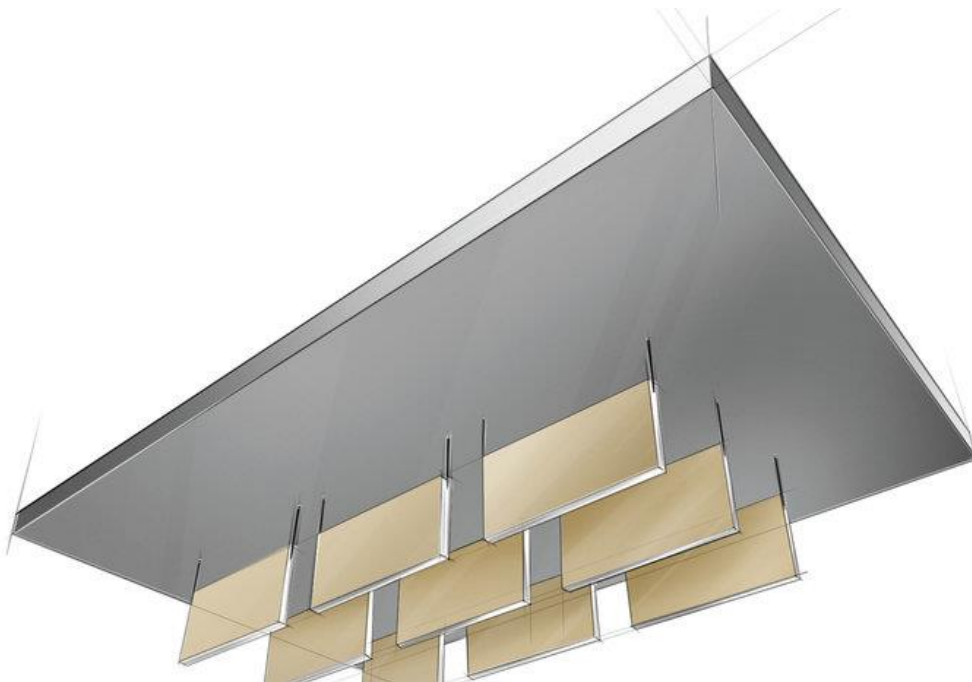


Figura 2.20 – Exemplo de aplicação de absorsores suspensos (adaptado de [11]).

3

ESTADO DA ARTE

3.1. INTRODUÇÃO

No decorrer deste capítulo é realizada uma análise breve da evolução histórica sobre o tema da absorção sonora, assim como uma pesquisa e estudo prévio de documentos já existentes sobre o efeito da pintura em materiais para absorção sonora.

3.2. ABSORÇÃO SONORA

Começando pelo “fundador” da Acústica de Edifícios, W.C. Sabine, que entre os séculos XIX e XX, depois de inúmeras experiências na Universidade de Harvard onde era Professor, com vista a melhorar a péssima acústica presente no auditório onde realizava as suas aulas [12], consegue relacionar a Absorção Sonora, o Volume e o Tempo de Reverberação, numa fórmula única [1].

Os seguintes estudos sobre absorção sonora foram realizados por Morse *et al.* [13] em 1940, onde começa a relacionar a absorção sonora e a impedância acústica de forma a determinação da mesma [14].

Em 1947, surgiu um estudo realizado por Bolt [15] sobre painéis perfurados para absorção sonora, funcionando como ressoadores. O estudo relaciona a taxa de perfuração do material, a dimensão das perfurações e a influência da variabilidade deste fator na frequência de pico [15].

Posteriormente, em 1950, London [16] descreve um processo para a determinação do coeficiente de absorção sonora para uma incidência difusa através do coeficiente de absorção sonora para uma incidência normal. Kinsler [17], no mesmo ano, desenvolveu um estudo sobre a propagação de ondas sonoras, onde estabeleceu algumas relações básicas relativamente a absorção sonora e impedância acústica [14].

Em 1951, Sacerdote *et al.* [18] mede o coeficiente de absorção sonora, assim como a frequência de ressonância em sistemas, através da incidência normal e aleatória das ondas sonoras e compara os resultados obtidos com os resultados adquiridos através de fórmulas de previsão. No mesmo ano, Ingard e Bolt [19] analisam o comportamento acústico da introdução de uma caixa de ar numa parede rígida, podendo o material poroso estudado estar protegido por um painel perfurado [14].

Poucos anos mais tarde, em 1954, Beranek [20] apresenta um documento da sintetização dos conceitos básicos bem como uma revisão do conhecimento no âmbito da absorção sonora [14].

Em 1978, surge uma das primeiras obras nacionais sobre o assunto, elaborado por Silva [21] que transportou para território nacional muito conhecimento existente internacionalmente sobre a matéria, conjugando-o com os seus próprios saberes sobre a absorção sonora. Anos mais tarde, em 1984, Silva [22] aprofunda o seu trabalho anterior sobre materiais e sistemas absorventes para absorção sonora criando algumas investigações experimentais dos vários tipos de sistemas estudados [14].

Pouco tempo depois, em 1986, Meisser [23] analisa e estuda alguns sistemas absorventes sonoros, frequência de ressonância e também a absorção sonora [14].

Posteriormente, em 2004, Cox e D'António [8] expõem um estudo alargado sobre sistemas de absorção sonora, assinalando o efeito da taxa de perfuração na absorção sonora [14].

Em Portugal, em 2005, Domingues [24] apresenta uma compilação dos diversos coeficientes de absorção sonora dos materiais mais utilizados na construção corrente [14].

3.3. EFEITO DA TINTA

Chrisler, em 1940 [25], publica um estudo sobre o efeito da tinta na absorção sonora de materiais acústicos, nesse documento foram analisados nove tipos de amostras distintas para perceber a variação do coeficiente de absorção sonora relativamente à pintura dos mesmos.

Todas as amostras descritas no documento foram pintadas com uma tinta interior branca lisa utilizando um pincel para avaliar o pior caso possível de recobrimento dos materiais absorventes sonoros, sendo que uma das amostras também foi pintada com uma pistola de pintura para avaliar a diferença de resultados deste método [25].

Para determinar a capacidade de recobrimento da tinta, foi considerado padrão obter uma superfície de aplicação razoavelmente branca, de seguida, pintar linhas pretas sobre a face do material acústico em causa e determinar finalmente o número de demãos necessárias de tinta branca para cobrir a tinta preta [25].

As amostras 1 e 2 são representativas de materiais criados a base de fibra de madeira similar a *fine excelsior* (fios longos de material vegetal provenientes da trituração da madeira), a única diferença entre as duas amostras é o facto de a primeira vir sem tinta aplicada e a segunda já vir de fábrica pré-pintada. O processo de pintura das amostras passou por pintar uma demão branca visto que as mesmas não eram brancas e de seguida a risca preta para determinar a quantidade de tinta necessária, foi preciso cinco demãos de pintura para ocultar o preto totalmente. Devido a este material específico ser composto por fibras, foi observado que seria mais eficaz usar uma pistola de pintura para proceder à pintura da amostra, gastando assim menos tinta [25].

Na Figura 3.1 pode-se observar o aspeto geral das amostras 1 e 2 e uma magnificação que permite reparar nas fibras da mesma. Na Figura 3.3 está apresentado uma fotografia ampliada da amostra depois de aplicadas cinco demãos de tinta [25].

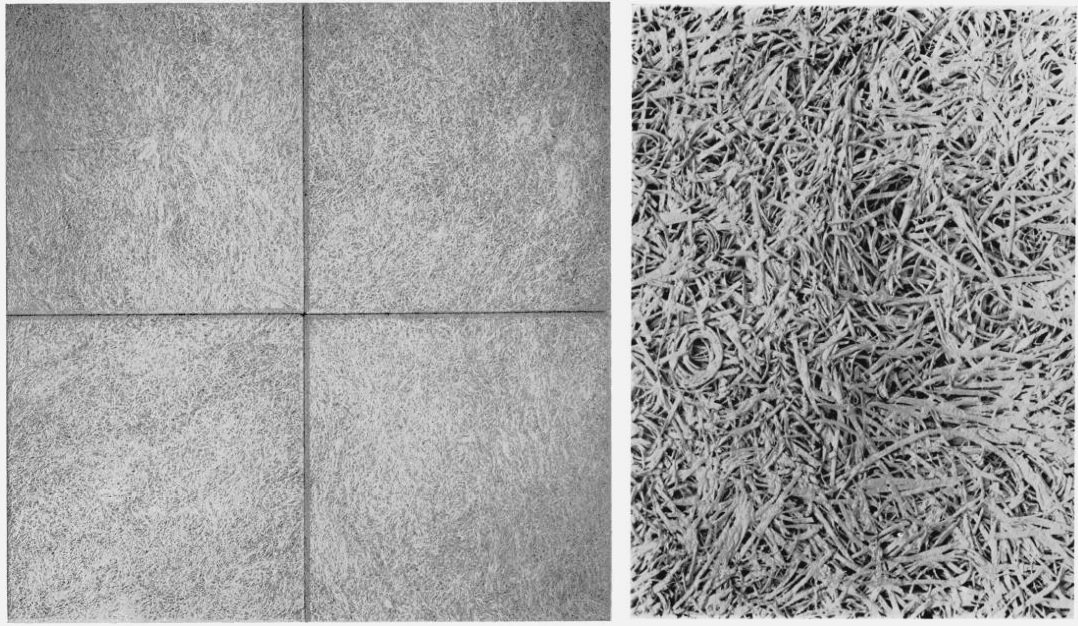


Figura 3.1 – Aspeto geral das amostras 1 e 2 (esq.) e aparência da superfície das amostras 1 e 2 previamente à pintura (ampliada) (dir.) [25].

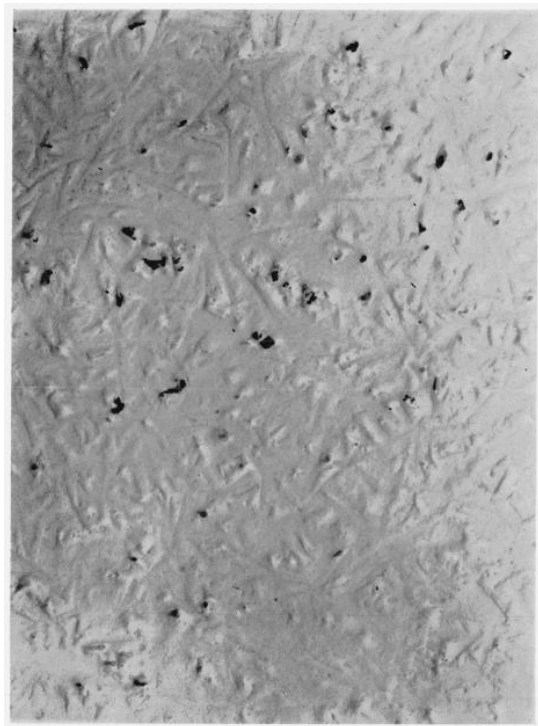


Figura 3.2 – Aparência da superfície da amostra 1 e 2 depois de pintada com pincel com cinco demãos de tinta (ampliada) [25].

A amostra 3 é de um material incombustível sem pintura prévia e neste caso foi necessário outra vez aplicar uma demão de pintura branca antes de aplicar as riscas pretas, para ocultar por completo a pintura preta foi preciso mais quatro demãos de tinta branco perfazendo no total cinco demãos de branco aplicadas [25].

Na Figura 3.3 pode-se observar o aspeto geral da amostra 3 e uma magnificação da mesma, na Figura 3.4 está apresentado a amostra depois de aplicadas cinco demãos de tinta com pincel [25].

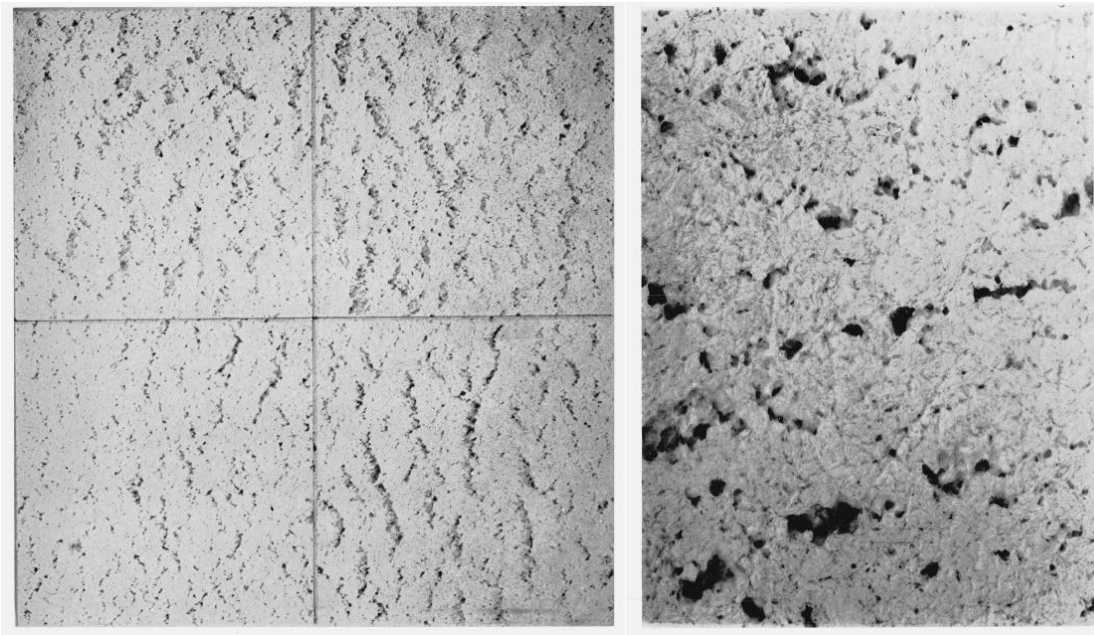


Figura 3.3 – Aspeto geral da amostra 3 (esq.) e aparência da superfície da amostra 3 previamente à pintura (ampliada) (dir.) [25].

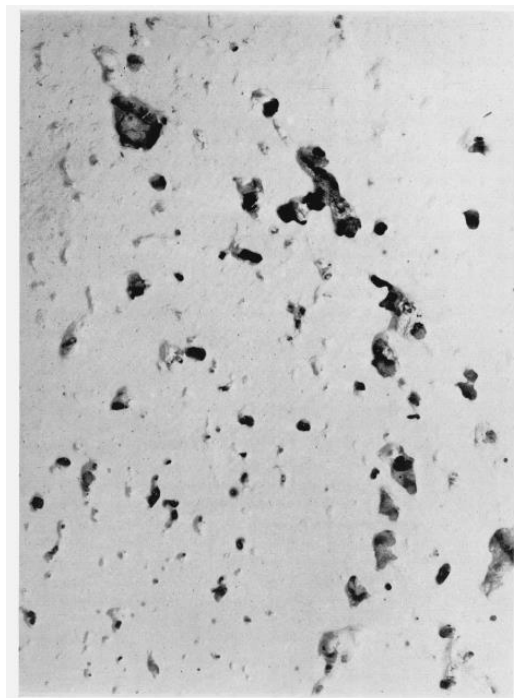


Figura 3.4 – Aparência da superfície da amostra 3 depois de pintada com pincel com cinco demãos de tinta (ampliada) [25].

A amostra 4 é um material perfurado presente nos ressoadores agrupados pré-pintado de branco, neste caso não foi necessário aplicar uma demão de pintura branca antes de aplicar as riscas pretas, para ocultar por completo a pintura preta foi preciso quatro demãos de tinta branco. Na Figura 3.5 é possível examinar o aspecto geral da amostra 4 e uma magnificação da mesma, na Figura 3.6 está apresentada a amostra depois de aplicadas quatro demãos de tinta com pincel [25].

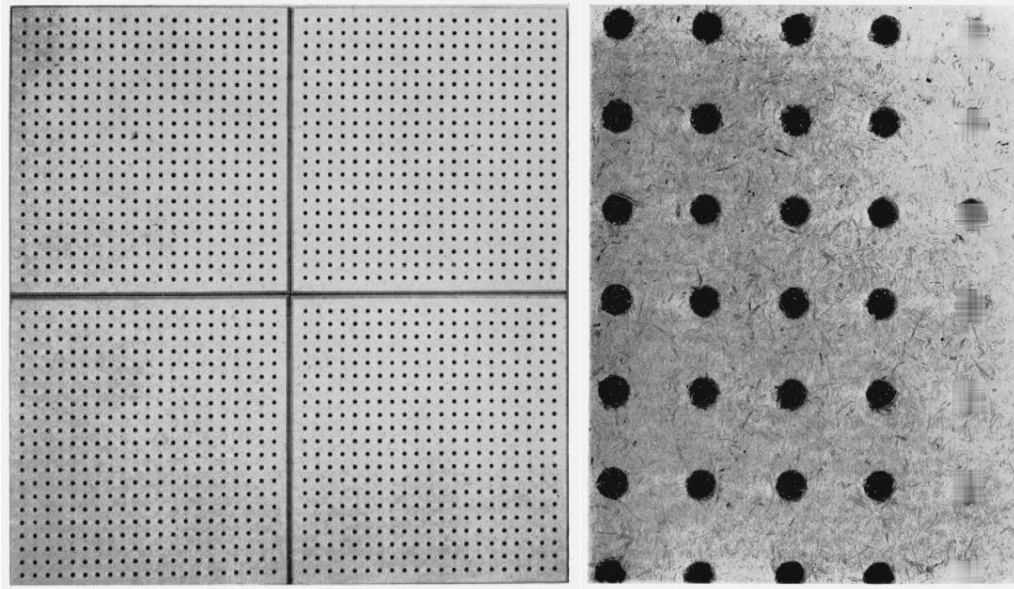


Figura 3.5 – Aspecto geral da amostra 4 (esq.) e aparência da superfície da amostra 4 previamente à pintura (ampliada) (dir.) [25].

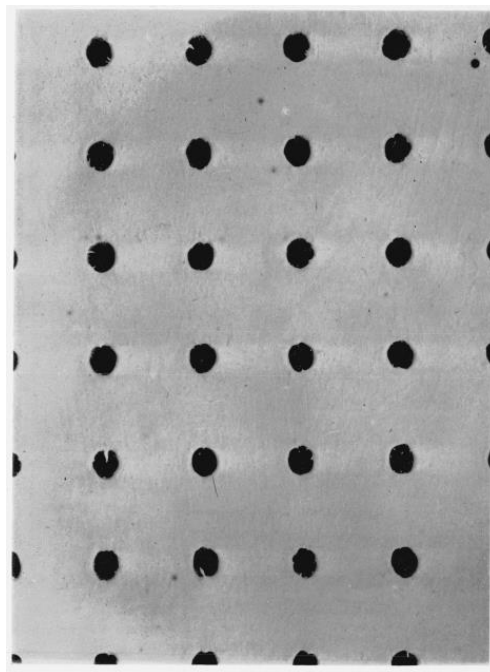


Figura 3.6 – Aparência da superfície da amostra 4 depois de pintada com pincel com 4 demãos de tinta (ampliada) [25].

A amostra 5 é um material fibroso muito parecido com as amostras 1 e 2, sendo que as fibras deste são bastante mais compactadas e mais finas. Este material veio de fábrica cru e neste caso foram aplicadas cinco demãos de pintura branca com o pincel e também foi executado uma amostra pintada à pistola, onde foi necessário realizar sete camadas de tinta. Na Figura 3.7 é possível observar o aspeto geral da amostra 5 e uma magnificação da mesma, na Figura 3.8 está apresentado a amostra depois de aplicadas cinco demãos de tinta com pincel e sete camadas com a pistola de pintura respetivamente [25].

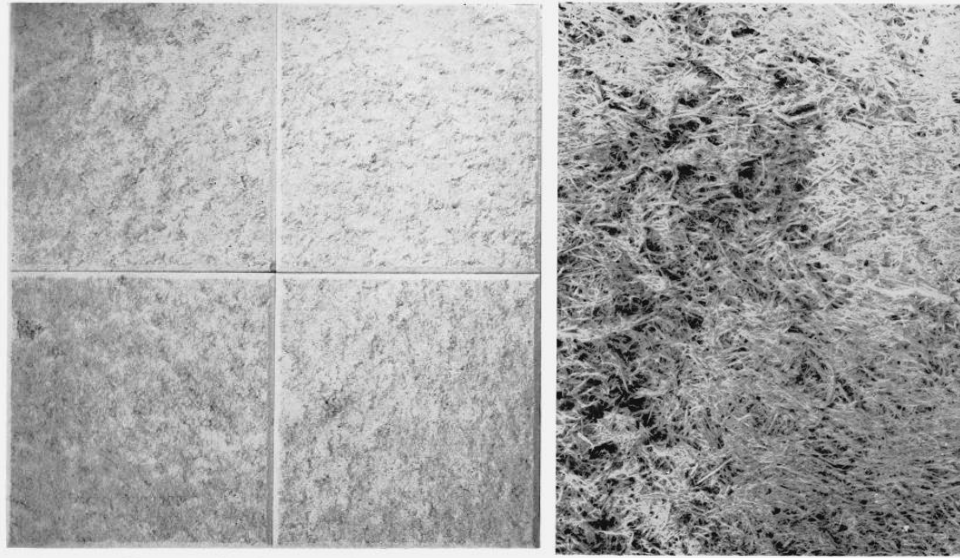


Figura 3.7 – Aspeto geral da amostra 5 (esq.) e aparência da superfície da amostra 4 previamente à pintura (ampliada) (dir.) [25].

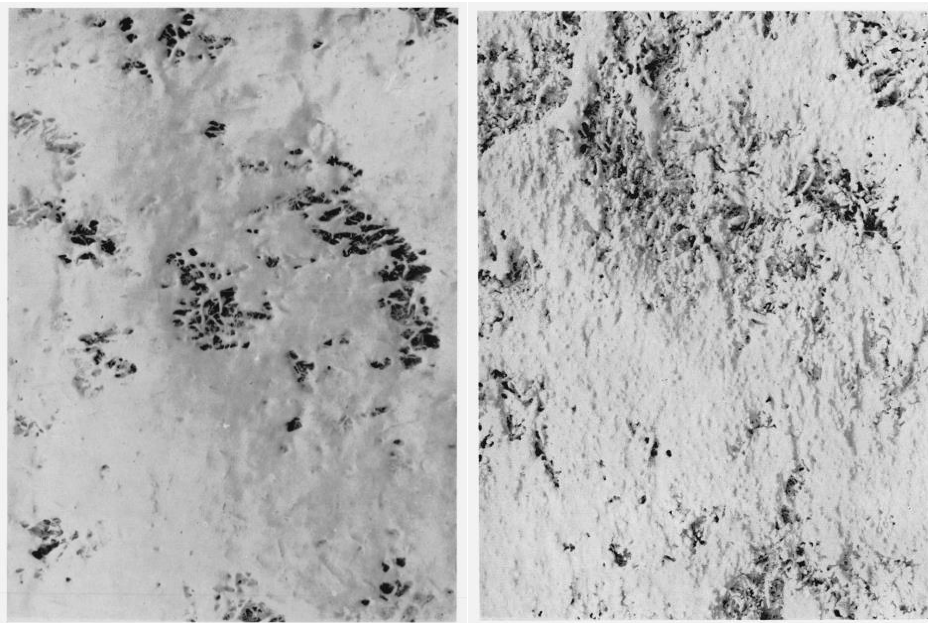


Figura 3.8 – Aparência da superfície da amostra 5 depois de pintada com pincel com cinco demãos de tinta (esq.) e com pistola de pintura com sete camadas de tinta (dir.) (ampliada) [25].

A amostra 6 é um material de absorção sonora que veio pré-pintado de branco de fábrica, foi necessário a aplicação de quatro demãos de tinta branco. Na Figura 3.9 é possível examinar o aspecto geral da amostra 6 e uma magnificação da mesma, na Figura 3.10 está apresentado a amostra depois de aplicadas quatro demãos de tinta com pincel [25].

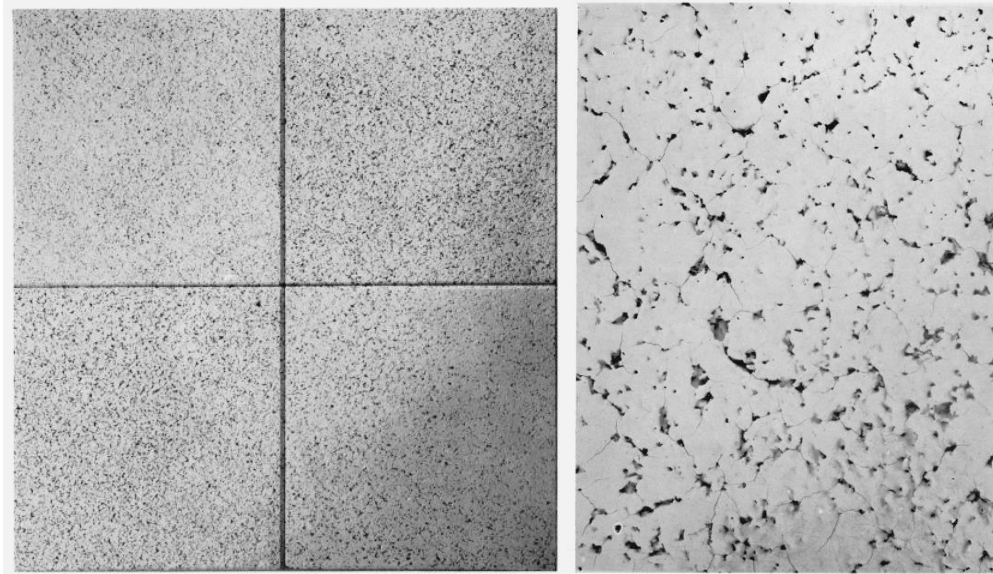


Figura 3.9 – Aspecto geral da amostra 6 (esq.) e aparência da superfície da amostra 6 previamente à pintura (ampliada) (dir.) [25].

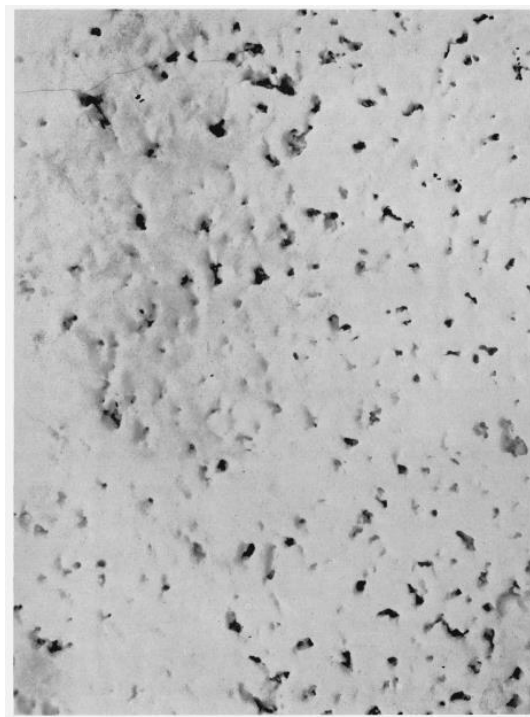


Figura 3.10 – Aparência da superfície da amostra 6 depois de pintada com pincel com quatro demãos de tinta (ampliada) [25].

As amostras 7 e 8 são do mesmo tipo de material, mas aplicados de maneira diferente, o emprego dos mesmos é feito através de projeção, no caso da amostra 7 foi aplicado um acabamento intitulado *travertine* pelo fabricante e na amostra 8 um acabamento liso. Na Figura 3.11 pode-se observar a amostra 7 depois de aplicadas seis demãos de tinta com pincel, na Figura 3.12 a amostra 8 foi submetida a apenas quatro demãos [25].

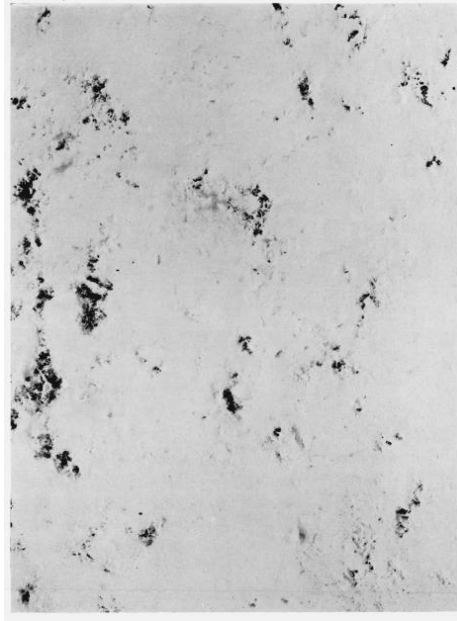


Figura 3.11 – Aparência da superfície da amostra 7 depois de pintada com pincel com seis demãos de tinta (ampliada) [25].



Figura 3.12 – Aparência da superfície da amostra 8 depois de pintada com pincel com quatro demãos de tinta (ampliada) [25].

Finalmente a amostra 9 é um material com a aparência superficial do gesso acústico, foram necessárias cinco demãos de tinta branca para ocultar as riscas pretas nesta amostra. Na Figura 3.13 é possível examinar uma magnificação da amostra e na Figura 3.14 está apresentada a amostra depois de aplicadas cinco demãos de tinta branca com pincel [25].



Figura 3.13 – Aparência da superfície da amostra 9 antes de ser aplicada pintura (ampliada) [25].

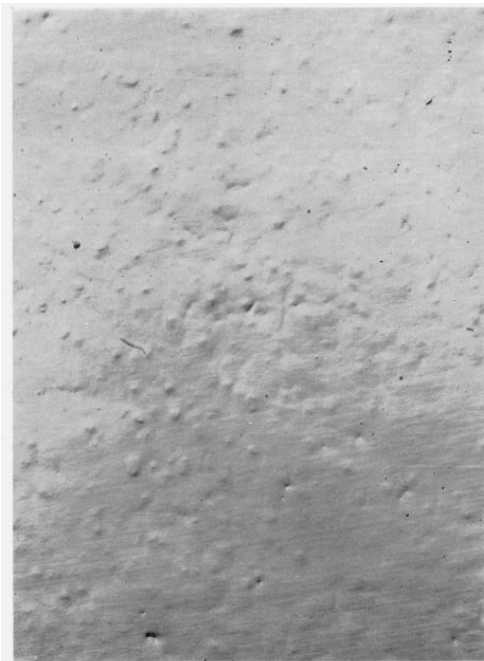


Figura 3.14 – Aparência da superfície da amostra 9 depois de ter sido aplicada cinco demãos de pintura com pincel (ampliada) [25].

No Quadro 3.1 podem ser observados os resultados obtidos para o coeficiente de absorção sonora das diferentes amostras testadas antes e depois de terem sido pintadas.

Quadro 3.1 – Valores dos coeficientes de absorção sonora para as amostras ensaiadas (adaptado de [25]).

Amostra	Acabamento superficial	Coeficiente de absorção sonora por frequência (Hz)						NRC
		125	250	500	1k	2k	4k	
1	Sem tinta	0,09	0,24	0,62	0,89	0,73	0,73	0,60
1a	5 demãos com pincel	0,14	0,49	0,83	0,61	0,30	0,22	0,55
2	Pintura de fábrica	0,07	0,22	0,54	0,87	0,78	0,77	0,60
2a	5 demãos adicionais com pincel	0,09	0,27	0,71	0,92	0,62	0,62	0,65
3	Sem tinta	0,11	0,29	0,78	0,84	0,75	0,63	0,65
3a	5 demãos com pincel	0,12	0,42	0,81	0,74	0,61	0,49	0,65
4	Pintura de fábrica	0,10	0,30	0,78	0,85	0,59	0,42	0,65
4a	4 demãos com pincel	0,08	0,33	0,83	0,86	0,53	0,37	0,65
5	Sem tinta	0,14	0,51	0,78	0,78	0,78	0,82	0,70
5a	Pintura à pistola 7 camadas	0,18	0,50	0,79	0,74	0,71	0,67	0,70
5b	5 demãos com pincel	0,25	0,41	0,61	0,47	0,34	0,36	0,45
6	Pintura de fábrica	0,07	0,25	0,70	0,63	0,53	0,63	0,55
6a	4 demãos adicionais com pincel	0,11	0,33	0,66	0,45	0,31	0,39	0,45
7	Sem tinta	0,54	0,87	0,78	0,73	0,78	0,75	0,80
7a	6 demãos com pincel	0,56	0,78	0,70	0,54	0,53	0,59	0,65
8	Pintura de fábrica	0,57	0,71	0,80	0,56	0,51	0,52	0,65
8a	4 demãos com pincel	0,58	0,76	0,51	0,28	0,25	0,13	0,45
9	Pintura de fábrica	0,13	0,40	0,68	0,63	0,60	0,68	0,60
9a	5 demãos adicionais com pincel	0,20	0,26	0,31	0,22	0,18	0,23	0,25

No Quadro 3.1 é possível observar que as amostras 1 e 2 comportam-se de forma similar sendo que, nas frequências mais elevadas a absorção sonora foi drasticamente reduzida. Na 2 amostra este efeito não é tão pronunciado. O fator mais surpreendente é o facto de o coeficiente de absorção sonora ter aumentado nas frequências próximas dos 500 Hz. Isto acontece devido ao facto deste tipo de material apresentar um espaçamento entre fibras relativamente elevado, o que traduz que uma diminuição parcial dos poros aumenta a eficácia nessa gama de frequências [25].

Na amostra 3 acontece o mesmo efeito de perda de absorção sonora nas frequências altas tal como nas amostras anteriores, mas devido à diferença de estrutura deste material, não ocorre o mesmo aumento de absorção sonora nas frequências de ordem dos 500 Hz depois da pintura [25].

A amostra 4 não apresenta nenhuma mudança significativa no seu comportamento após pintura, devido ao facto de se tratar de um material perfurado do tipo utilizado nos ressoadores agrupados, seria necessário cobrir os seus poros com uma película ou tecido para conseguir bloquear os poros do mesmo, tal não acontece com uma simples pintura [25].

Em relação à amostra 5, esta tem um comportamento muito parecido à amostra 3 quando pintada com pincel, com exceção a notar-se um incremento da absorção sonora nas frequências mais baixas do espectro depois de pintada. Quando a pintura foi realizada com pistola, é possível observar que o efeito negativo na absorção sonora do material é muito reduzido sobretudo nas frequências altas em relação à utilização de um pincel [25].

Na amostra 6 a diminuição da absorção sonora nas frequências altas é muito acentuada, é provável que isso deva-se ao facto de os poros menores ficarem completamente obstruídos, apesar dos maiores continuarem bem aberto [25].

As amostras 7 e 8 foram aplicadas por projeção e devido ao facto de a amostra 7 ter sido aplicada com um acabamento mais rugoso, não é tão acentuada a diminuição do coeficiente sonoro de absorção sonora neste material como acontece na amostra 8 onde foi aplicada com um acabamento considerado liso. Apesar dessas diferenças, as duas amostras veem a sua absorção sonora diminuída nas frequências altas [25].

Finalmente na amostra 9 é possível observar uma diminuição da absorção sonora pelo espectro completo das frequências, exceto nas frequências mais baixas, esta perda de característica deve-se ao facto de a pintura com recurso a pincel ter obstruído a porosidade superficial do material.

Deste estudo é possível concluir que a pintura com recurso a pistola de pintura, é mais eficaz em não afetar tão gravosamente o coeficiente de absorção sonora dos materiais. A utilização de tintas mais diluídas de forma a não formar um filme que cubra a superfície por completo é também mais eficaz visto que, o verdadeiro efeito negativo da tinta é a quantidade de pigmentos que ficam depositados na superfície do material de absorção sonora, quantas mais demãos foram aplicadas, mais pigmentos ficam depositados, o que causa a obstrução dos poros e consequentemente a diminuição da absorção sonora [26].

Em 2020, Magalhães [26] realiza uma dissertação sobre o efeito da pintura na absorção sonora de materiais absorventes sonoros, onde foram ensaiadas quatro amostras de um aglomerado composto de cortiça (duas amostras com 2 mm de espessura e duas amostras com 6 mm). As amostras de cortiça variam entre si também em massa específica, sendo duas delas menos densas e, uma amostra do material *BASWAphon FINE 30 mm* que é constituído por placas de lã mineral que depois de fixadas sobre a zona de aplicação são revestidas por uma ou várias camadas de material mineral de forma a obter uma superfície lisa e homogénea [26].

No Quadro 3.2 é possível observar os valores do coeficiente de absorção sonora (α_s), NRC e α_w obtidos nos ensaios realizados nas quatro amostras de cortiça na câmara reverberante segundo a norma NP EN ISO 354 [27] *antes e depois* da pintura, sendo a denominação das amostras:

- C6 (amostra mais densa com 6 mm de espessura);
- C6-*leve* (amostra menos densa com 6 mm de espessura);
- C2 (amostra mais densa com 2 mm de espessura);
- C2-*leve* (amostra menos densa com 6 mm de espessura).

Existe uma diferença do comportamento acústico entre as amostras mesmo antes da pintura, as amostras menos densas em comparação às mais densas apresentam maior absorção sonora. Uma possível explicação para este aumento de absorção sonora será que devido a terem menor massa específica, as amostras *C6-leve* e *C2-leve* apresentam uma maior quantidade de poros tanto à superfície como interiores, aumentando a sua capacidade de dissipação de energia para altas frequências [26].

No Quadro 3.2 é possível observar também, os resultados obtidos para o coeficiente de absorção sonora para a amostra de *BASWaphon FINE 30 mm antes e depois* da aplicação da pintura, este ensaio também se rege pela norma NP EN ISO 354 [27].

Quadro 3.2 – Valores dos coeficientes de absorção sonora (α_s) das cinco amostras testadas *antes e depois* de pintura (adaptado de [26]).

Amostra	C6		C2		C6-leve		C2-leve		BASWaphon	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
100	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,01	0,02	0,02	0,03
125	0,04	0,02	0,03	0,03	0,01	0,03	0,01	0,01	0,09	0,12
160	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,03	0,13	0,21
200	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,21	0,43
250	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,28	0,48
315	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,04	0,49	0,50
400	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,05	0,66	0,48
500	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,07	0,75	0,46
630	0,01	0,00	0,03	0,05	0,02	0,01	0,02	0,11	0,88	0,48
800	0,01	0,01	0,07	0,07	0,02	0,01	0,03	0,16	0,94	0,47
1k	0,03	0,01	0,15	0,14	0,03	0,03	0,09	0,27	0,97	0,50
1,25	0,05	0,01	0,14	0,24	0,04	0,03	0,15	0,37	1,01	0,43
1,6k	0,08	0,02	0,12	0,42	0,09	0,06	0,18	0,30	0,95	0,36
2k	0,14	0,04	0,09	0,46	0,16	0,16	0,18	0,22	0,91	0,31
2,5k	0,19	0,08	0,07	0,41	0,23	0,25	0,15	0,15	0,86	0,27
3,15k	0,22	0,13	0,04	0,34	0,25	0,40	0,09	0,10	0,79	0,23
4k	0,24	0,26	0,06	0,31	0,22	0,28	0,07	0,07	0,73	0,18
5k	0,20	0,38	0,06	0,33	0,15	0,14	0,06	0,07	0,73	0,16

No Quadro 3.3 é possível observar a variação dos valores de α_s obtidos para as amostras ensaiadas.

Quadro 3.3 – Variação dos valores do coeficiente de absorção sonora ($\Delta\alpha_s$) em valores absolutos e sobre a forma de percentagem ($\Delta\alpha_{SP}$ (%)), das cinco amostras testadas *depois* e *antes* de pintura (adaptado de [26]).

Frequência (Hz)	C2		C2-leve		C6		C6-leve		BASWA-phon
	$\Delta\alpha_s$	$\Delta\alpha_{SP}$	$\Delta\alpha_s$	$\Delta\alpha_{SP}$	$\Delta\alpha_s$	$\Delta\alpha_{SP}$	$\Delta\alpha_s$	$\Delta\alpha_{SP}$	$\Delta\alpha_s$
100	-0,01	-29	0,00	-8	-0,03	-65	-0,01	-20	0,01
125	-0,03	-72	0,01	25	-0,02	-71	-0,01	-57	0,03
160	-0,01	-28	0,00	18	0,01	93	0,01	43	0,08
200	0,01	93	0,00	-8	0,01	71	0,01	72	0,22
250	0,00	43	0,01	62	0,00	-17	0,01	151	0,20
315	0,01	62	0,01	202	0,00	14	0,02	65	0,01
400	0,00	57	0,01	133	0,00	37	0,03	183	-0,18
500	0,01	206	0,01	345	0,00	3	0,04	138	-0,29
630	0,01	97	0,00	94	0,00	-13	0,05	107	-0,40
800	0,01	56	0,00	-6	-0,04	-53	0,09	125	-0,47
1k	0,00	12	0,02	174	-0,06	-42	0,14	101	-0,47
1,25k	-0,01	-19	0,03	359	0,01	7	0,13	53	-0,58
1,6k	0,01	11	0,05	251	0,06	55	-0,12	-29	-0,59
2k	0,02	13	0,12	285	0,09	92	-0,25	-53	-0,60
2,5k	0,04	19	0,17	201	0,08	125	-0,26	-63	-0,59
3,15k	0,03	15	0,27	200	0,05	130	-0,24	-71	-0,56
4k	-0,02	-10	0,02	6	0,01	18	-0,24	-77	-0,55
5k	-0,05	-26	-0,25	-65	0,00	-5	-0,26	-79	-0,57

No Quadro 3.4 segue o resumo da variação dos valores de NRC e de α_w para as amostras testadas.

Quadro 3.4 – Variação dos valores de NRC e α_w obtidos nas cinco amostras *antes* e *depois* de pintura (adaptado de [26]).

	C2	C2-leve	C6	C6-leve	BASWAphon
NRC	0,00	+0,05	+0,05	0,00	-0,36
α_w	0,00	0,00	0,00	+0,05	-0,40
Classe	-	-	+1 classe	-	-2 classes

Dos resultados obtidos durante os ensaios, é possível observar que após pintura existe uma diminuição global de α_s com exceção da amostra C6 [26].

Na amostra C2 devido ao facto da zona de maiores valores de coeficientes de absorção sonora se estender para além das bandas de 1/3 de oitava analisadas (>5000 Hz) e aplicação da tinta não só baixar os valores de α_s , mas também baixar as bandas de frequência onde se encontram os maiores valores de α_s , é possível pensar que a tinta teve um efeito positivo na amostra, mas analisando as outras características como o NRC e α_w verifica-se que os efeitos da tinta cancelam-se neste tipo de amostra [26].

Na amostra C2-*leve*, pode-se observar um fenómeno semelhante ao ocorrido na amostra C2, mas devido ao facto de as bandas de frequência de maior eficácia serem maiores que 5 kHz o impacto da tinta é considerado positivo apesar da diminuição do α_s . Estas conclusões são apoiadas pelos resultados obtidos no NRC [26].

Na amostra C6, o efeito da tinta foi positivo, ocorrendo o resultado oposto das duas amostras analisadas anteriormente. Neste caso específico, a aplicação de pintura aumentou os valores do coeficiente de absorção sonora, assim como moveu a zona de maior eficácia para frequências mais elevadas [26].

A última amostra de composto de cortiça C6-*leve*, vê a sua eficácia diminuir devido à pintura nas bandas de frequências dos 100 e 125 Hz e dos 1600 aos 5 kHz, nas restantes frequências viu a sua eficácia aumentar tornando esta amostra num material absorvente de frequências médias após pintura [26].

Em relação à amostra de *BASWAphon FINE 30 mm*, verifica-se um aumento dos valores de coeficiente de absorção sonora nas frequências mais baixas do espectro sonoro, em contraste e mais importante verifica-se uma diminuição drástica da absorção sonora nas frequências mais altas. Os valores das outras características como o NRC e α_w , comprovam o facto que a pintura causou uma diminuição significativa da capacidade de absorção sonora do material [26].

Da análise dos estudos realizados anteriormente sobre o efeito da pintura nos revestimentos porosos e fibrosos para absorção sonora, é possível observar uma diminuição da capacidade de absorção sonora destes materiais depois de aplicada uma camada de tinta, transformando o comportamento acústico dos mesmos.

4

ENSAIOS EXPERIMENTAIS

4.1. METODOLOGIA DOS ENSAIOS

4.1.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado os métodos utilizados para a realização dos ensaios experimentais, assim com as fórmulas usadas para atingir valores significativos para este documento. É também apresentado neste capítulo as normas que se regem os ensaios e a caracterização das amostras utilizadas, os aparelhos utilizados assim como tudo o que foi necessário fazer de forma a obter os resultados pretendidos.

4.1.2. MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Todos os ensaios foram realizados na câmara reverberante *RI* do Laboratório de Acústica da FEUP, seguindo a norma NP EN ISO 354 [27]. Os primeiros ensaios foram realizados no dia 23 de abril de 2021 para as amostras antigas sem pintura e no dia 12 de maio de 2021 foram realizados os ensaios para as amostras antigas pintadas e para a câmara reverberante vazia, no dia 12 de julho de 2021 foram realizados os ensaios para as amostras novas. Esta câmara tem uma forma trapezoidal para aumentar a formação de um campo difuso e contém painéis difusores suspensos de forma a igualmente aumentar o efeito de difusão.

Segundo a norma, as medições devem ser efetuadas por bandas de um terço de oitavas com as seguintes frequências centrais em *hertz*:

100	125	160	200	250	315
400	500	630	800	1000	1250
1600	2000	2500	3150	4000	5000

A câmara *RI* apresenta um volume de aproximadamente 210 m³ o que, segundo a norma implica, que os valores de área de absorção sonora equivalentes máximos de referência devem ser multiplicados por um fator:

$$\left(\frac{V}{200}\right)^{2/3} = 1,033 \quad (4.1)$$

No Quadro 4.1 podem ser observados os valores resultantes da correção da área de absorção sonora equivalente máxima de referência, devido ao volume da sala ser superior a 200 m³, para as respetivas frequências de ensaio.

De forma a garantir que a área do provete, geralmente compreendida entre 10 e 12 m² para volumes de câmara inferior a 200 m³ seja adequada para realizar o ensaio segundo a norma, é necessário multiplicar o limite superior pela fórmula 4.1, o que resulta para a câmara R1 que o limite superior de área de provete é de 12,4 m².

Preferencialmente os provetes devem ser colocados de forma retangular com um rácio entre *comprimento* e *largura* entre 0,7 e 1,0, e de maneira a não ficarem paralelos às paredes, mas com um espaçamento de 1 m das mesmas. Em todos os ensaios executados as amostras foram colocadas de forma a cumprir a norma (Figura 4.3, 4.6, 4.8 e 4.10).

Quadro 4.1 – Valores de área máxima de absorção equivalente corrigidos de acordo com a normalização para o volume da câmara R1.

Banda de frequência (Hz)	Área de absorção sonora equivalente (m ²)	Banda de frequência (Hz)	Área de absorção sonora equivalente (m ²)	Banda de frequência (Hz)	Área de absorção sonora equivalente (m ²)
100	6,7	400	6,7	1600	8,2
125	6,7	500	6,7	2000	9,8
160	6,7	630	6,7	2500	10,8
200	6,7	800	6,7	3150	12,4
250	6,7	1000	7,2	4000	13,4
315	6,7	1250	7,7	5000	14,4

A temperatura e a humidade relativa no interior da câmara podem influenciar os valores do tempo de reverberação especialmente nas frequências mais altas e com humidade relativa baixa. Assim sendo, estes dois fatores têm de ser controlados. As medições segundo a norma têm de ser executadas numa sala vazia e na sala contendo o provete de ensaio em condições de temperatura e humidade relativa praticamente idênticas para que o ajuste devido à absorção sonora do ar não difira de forma significativa. Em todas as circunstâncias, a humidade relativa na sala tem de ser no mínimo de 30% e no máximo de 90% e, a temperatura tem de ser no mínimo de 15 °C durante o tempo de ensaio. É importante também manter o provete de teste na sala onde vai ser realizados os ensaios para se ajustar as condições ambientais antes da realização dos mesmos. Na câmara R1 a temperatura durante a realização dos ensaios manteve-se nos 18° C e a humidade relativa nos 55%.

Segundo a norma existem dois métodos de medir as curvas de decaimento:

- Método do ruído interrompido;
- Método de resposta impulsiva.

O método utilizado para a realização deste documento foi o primeiro. Este resulta de um processo estatístico e é necessário calcular a média de várias curvas de decaimento ou tempos de reverberação medidos com combinações de posições de microfone/altifalante para obter resultados adequados. O segundo método é uma função determinística, portanto, não sujeito a desvios estatísticos, não sendo necessário realizar o cálculo de médias. O maior inconveniente deste segundo método é que requer equipamentos mais sofisticados e mais processamento de dados do que o primeiro.

As medições devem ser executadas com diferentes posições de microfone, as quais devem estar espaçadas de pelo menos 1,5 m entre elas, 2,0 m de qualquer fonte sonora e 1,0 m de qualquer superfície da câmara e do provete de ensaio.

O sinal na câmara reverberante tem de ser gerado por fontes sonoras com um padrão de transmissão omnidirecional e as posições das mesmas não podem estar a menos de 3,0 m entre elas.

O número de combinações espaciais independentes para a medição de curvas de decaimento tem de ser pelo menos de doze. Sendo assim, o número de posições de microfones vezes o número de posições de altifalantes tem de ser no mínimo de doze. O número mínimo de posições de microfones são três e de posições de altifalantes são duas.

Durante os ensaios realizados na câmara reverberante foram utilizadas três posições para a fonte sonora e quatro posições para os microfones, perfazendo as doze combinações mínimas da norma.

No método utilizado durante os ensaios (método do ruído interrompido), segundo a norma, deve ser utilizada uma fonte sonora que produz um ruído de banda larga ou de banda limitada com espectro de frequência contínuo. Ao usar um ruído de banda larga e um analisador em tempo real, o espectro do ruído usado deve ser tal que as diferenças dos níveis de pressão sonora resultantes na sala sejam inferiores a 6 dB nas bandas adjacentes de um terço de oitava. Ao usar um ruído de banda limitada, a largura de banda deve ser de pelo menos um terço de oitava. Neste caso concreto foi utilizado uma fonte que produz um espectro de banda larga (ruído branco) e um analisador de tempo real.

O sinal de excitação deve ser suficientemente longo para produzir um nível de pressão sonora em estado estacionário em todas as bandas de frequência de interesse antes de ser desligado. Para obter condições em regime permanente, o tempo de excitação deve ser pelo menos metade da estimativa do tempo de reverberação esperado.

O nível de pressão sonora do sinal de excitação antes do decaimento deve ser suficientemente elevado para que o nível do valor mais baixo da faixa de avaliação seja de pelo menos 10 dB acima do nível de ruído de fundo.

A média de várias medições realizadas numa posição de microfone / altifalante é obrigatória para reduzir a incerteza de medição causada por desvios estatísticos. O número de médias realizadas deve ser de pelo menos três. Dois métodos de média são possíveis. O método de cálculo da média utilizado nestes ensaios consiste em calcular a média das curvas de decaimento registadas numa posição microfone / altifalante usando a fórmula 4.2.

$$L_p(t) = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{pn}(t)}{10}} \right] \quad (4.2)$$

Sendo,

$L_p(t)$ o nível de pressão sonora médio, no instante t , calculado para um número total de N decaimentos;
 $L_{pn}(t)$ o nível de pressão sonora do decaimento de ordem n , no instante t .

Este método é geralmente conhecido como "média do conjunto". O segundo método de média deve ser aplicado quando a média do conjunto não é possível devido aos equipamentos e métodos de processamento de resultados mais sofisticados do que os usados no método do ruído interrompido. As curvas de decaimento simples devem ser avaliadas primeiro e os tempos de reverberação resultantes devem ser calculados usando a média aritmética. As curvas de decaimento registadas em diferentes posições de microfone / altifalante não podem ser usadas para a realização da média.

Durante os ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Sonómetro *Bruel & Kjaer 2260* (Figura 4.1);
- Fonte Sonora *Bruel & Kjaer Type 4224* (Figura 4.1).



Figura 4.1 – Sonómetro *Bruel & Kjaer 2260* (esq.) e fonte sonora *Bruel & Kjaer 4224* (dir.) [fotos do autor].

4.1.3. MÉTODO DE CÁLCULO

O valor do tempo de reverberação da sala em cada banda de frequência é expresso pela média logarítmica do número total de medições efetuadas nessa mesma banda. Os tempos médios de reverberação da sala em cada banda de frequência sem e com o provete, são respetivamente $T1$ e $T2$ e, devem ser calculados e expressos com pelo menos duas casas decimais.

O coeficiente de absorção sonora a_s dos provetes de ensaio é calculado através da expressão 4.8.

$$a_s = \frac{A_T}{S} \quad (4.3)$$

Sendo,

- A_T – área de absorção sonora equivalente da amostra (m^2);
- S – área (m^2) coberta pelo provete de ensaio.

A área de absorção sonora equivalente da amostra testada, A_T , em metros quadrados, é calculada usando a subtração da área de absorção sonora equivalente da sala com amostra (A_2) e vazia (A_1):

$$A_T = A_2 - A_1 \quad (4.4)$$

$$A_2 = \frac{55,3V}{cT_2} - 4Vm'_2 \quad (4.5)$$

$$A_1 = \frac{55,3V}{cT_1} - 4Vm'_1 \quad (4.6)$$

Sendo,

V – volume da câmara reverberante vazia (m^3);

c – celeridade (m/s) calculada através da expressão 4.6 (válida para temperaturas entre 15 e 30 °C);

T – tempo de reverberação da câmara reverberante no ensaio correspondente (s);

m' – coeficiente de atenuação devido às condições climáticas da sala (m^{-1}) calculado através da expressão 4.7 (Quadro 4.2).

$$m' = \frac{a'}{10 \cdot \log(e)} \quad (4.7)$$

Sendo,

a' – coeficiente de atenuação usado na norma NP ISO 9613-1 [28] (Quadro 4.2).

$$c = (331 + 0,6t) \quad (4.8)$$

Sendo t , a temperatura do ar em graus celsius.

Quadro 4.2 – Valores de m' e a' utilizados para a determinação do coeficiente de absorção sonora adaptados para a câmara R1 (humidade relativa de 55% e temperatura de 18° C) (adaptado de [28]).

Banda de frequência (Hz)	a'	m'	Banda de frequência (Hz)	a'	m'
100	0,000	0,00000	800	0,004	0,00092
125	0,000	0,00000	1000	0,004	0,00092
160	0,001	0,00023	1250	0,005	0,00115
200	0,001	0,00023	1600	0,007	0,00161
250	0,001	0,00023	2000	0,010	0,00230
315	0,002	0,00046	2500	0,013	0,00299
400	0,002	0,00046	3150	0,019	0,00437
500	0,003	0,00069	4000	0,029	0,00668
630	0,003	0,00069	5000	0,044	0,01013

4.2. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

4.2.1. SONACOUSTIC® ALM

Na realização destes ensaios foi estudada a solução acústica *Sonacoustic® ALM* da S.T.I.E.R.

As amostras antigas testadas foram provenientes da estação de metro do Porto do “Campo 24 de Agosto” após cerca de 9 anos de utilização e foram testadas amostras semelhantes, mas novas. Esta solução consiste em painéis de lã mineral de alta densidade, com espessura variável que são diretamente colados numa superfície existente com adesivos específicos resultando assim numa superfície contínua que posteriormente é barrada com uma camada de *ALM* com cerca de 3,4 mm de espessura.

Este tipo de solução tem uma resistência à humidade relativamente elevada, podendo ser aplicada em situações com humidade relativa inferior a 70% e, temperaturas inferiores a 32°C, mantendo-se neste tipo de condições perfeitamente estável. Além disso apresenta uma classe de resistência ao fogo elevada (material não combustível, pouco ou nenhum fumo e sem resíduos nos primeiros 10 minutos de incêndio).

A composição da solução assim como do seu barramento posterior pode ser observada nos Quadros 4.3 e 4.4.

Quadro 4.3 – Composição do painel de lã mineral de alta densidade usado na composição do *Sonacoustic® ALM* (adaptado de [29]).

Substância	Conteúdo (%)
Painel de Lã mineral wood Isover	75-90
Adesivo de PVA à base de água	1-2
Tinta Acrílica à base de água	10-20
Resina fenólica modificada com ureia	5-10

Quadro 4.4 – Composição da massa de barramento (ALM) usado na composição do *Sonacoustic® ALM* (adaptado de [29]).

Substância	Conteúdo (% peso)
Balastro mineral expandido	>40
Fibra mineral	<30
Silicato de alumínio	<15
Fosfato	<15

Estes sistemas podem ser aplicados diretamente em paredes ou tetos contra suporte de betão, alvenaria rebocada, tetos falsos de gesso cartonado ou podem ser montados diretamente como teto falso com junta oculta, com e sem painel de lã mineral base.

Sucintamente este tipo de sistema pode ser aplicado das seguintes formas:

- 2 a 3,5 mm de espessura (sem painel base);
- 23 mm de espessura (com painel base de 21 mm);
- 33 mm de espessura (com painel base de 31 mm).

O desempenho acústico destas soluções, segundo a ficha técnica do produto, pode ser observado no Quadro 4.5 consoante a solução adotada (conforme ensaios da empresa LBP/SIGHT).

Quadro 4.5 – Desempenho acústico da amostra *Sonacoustic® ALM* fornecido pelo fabricante com espessura de 33 mm (com painel base de 31 mm) (adaptado de [29]).

Espessura mm	Coeficiente de absorção sonora por bandas de oitavas						NRC
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
33	0,21	0,62	1,00	0,98	0,95	0,90	0,90

Direcionando o estudo para a amostra com 33 mm de espessura (teórica) devido a ser o tipo de amostras supostamente ensaiadas para a realização deste documento, a mesma que foi fornecida para a realização dos ensaios é composta por um painel base de lã mineral com uma massa volúmica de 120 kg/m^3 e por um barramento superficial *ALM* perfazendo no total uns 30 mm, o que difere dos 96 kg/m^3 escritos no catálogo. As amostras recebidas apresentavam uma espessura de cerca de 3 cm, diferentes das de catálogo. No Quadro 4.6 e na Figura 4.2, é possível observar com maior detalhe os resultados dos ensaios acústicos fornecidos pelo fabricante realizados pela empresa LBP/SIGHT para amostras compostas com lã mineral com uma massa volúmica de 96 kg/m^3 e espessura de 33,5 mm. A diferença de massa volúmica entre as amostras usadas ensaiadas no laboratório da FEUP na realização deste documento e das amostras novas ensaiadas por uma empresa externa, podem possivelmente justificar alterações nos resultados obtidos.

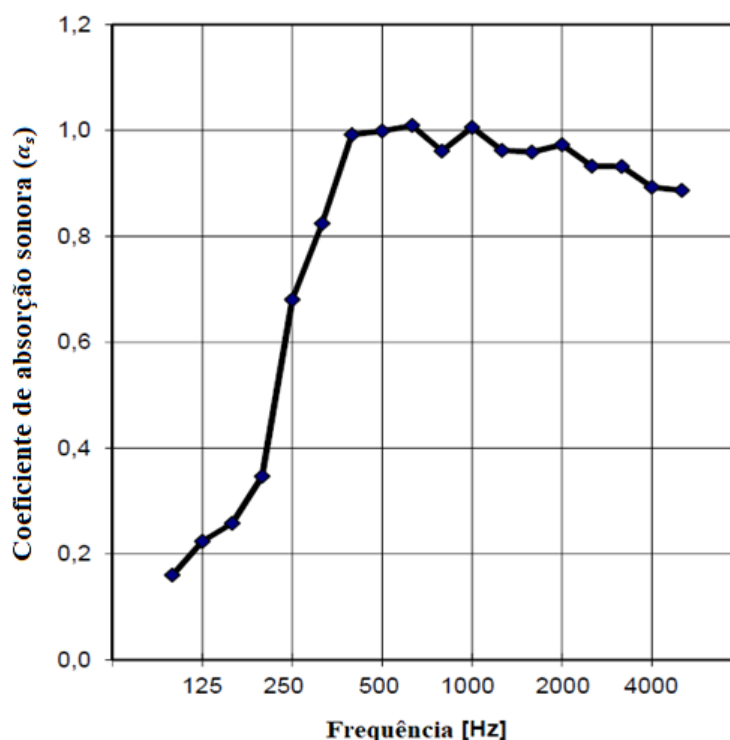


Figura 4.2 – Valores do coeficiente de absorção sonora em função da frequência da amostra *Sonacoustic® ALM* com espessura de 33,5 mm (com painel base de 30 mm e 3,5 mm de ALM) realizado pela LBP/SIGHT (adaptado de [30]).

Quadro 4.6 – Desempenho acústico da amostra Sonacoustic® ALM com espessura de 33,5 mm (com painel base de 30 mm com densidade de 96 kg/m³ e 3,5 mm de ALM) realizados pela empresa LBP/SIGHT (adaptado de [30]).

Frequência (Hz)	α_s	$\bar{\alpha}_s$	NRC	α_w	Classe
100	0,16	0,21	0,90	0,90	A
125	0,22				
160	0,26				
200	0,35	0,62			
250	0,68				
315	0,82				
400	0,99	1,00			
500	1,00				
630	1,01				
800	0,96	0,98			
1000	1,01				
1250	0,96				
1600	0,96				
2000	0,97	0,95			
2500	0,93				
3150	0,93				
4000	0,89	0,90			
5000	0,89				

As amostras retiradas da estação de metro do Porto “Campo 24 de Agosto” foram fornecidas em placas com a dimensão de 100x100 mm, pelo que foi necessário utilizar dez placas para obter a área final de amostra de 10 m² para conseguir realizar os ensaios (Figura 4.3). As amostras novas recebidas na última da hora também foram ensaiadas de forma a perfazer 10 m².

Após a realização dos primeiros ensaios, procedeu-se à limpeza dos painéis com ar comprimido para garantir uma superfície limpa (sem grande influência visualmente, pois os painéis pareciam estar em ótimo estado de conservação). De seguida foi aplicado uma camada de tinta de silicato, da marca *MAGJACOL*® de cor acastanhada com *spray* de pintura (Figura 4.4) com referência de cor de código S 5030 Y40 R (Figura 4.5), apenas foi aplicada uma demão. Após a realização do processo de pintura os painéis ficaram a secar durante dois dias de forma a garantir resultados mais realistas simulando condições de aplicação em obra (Figura 4.6). Infelizmente não foi possível medir as amostras depois de limpas (com ar comprimido) devido a falta de tempo. Na Figura 4.7 é possível observar a superfície do barramento superficial da amostra ensaiada antiga antes e após pintura da mesma.



Figura 4.3 – Disposição das placas de *Sonacoustic@ ALM* no piso da câmara reverberante para a realização do ensaio sem pintura [foto do autor].



Figura 4.4 – Realização do processo de pintura à *spray* da amostra de *Sonacoustic@ ALM* [foto do autor].

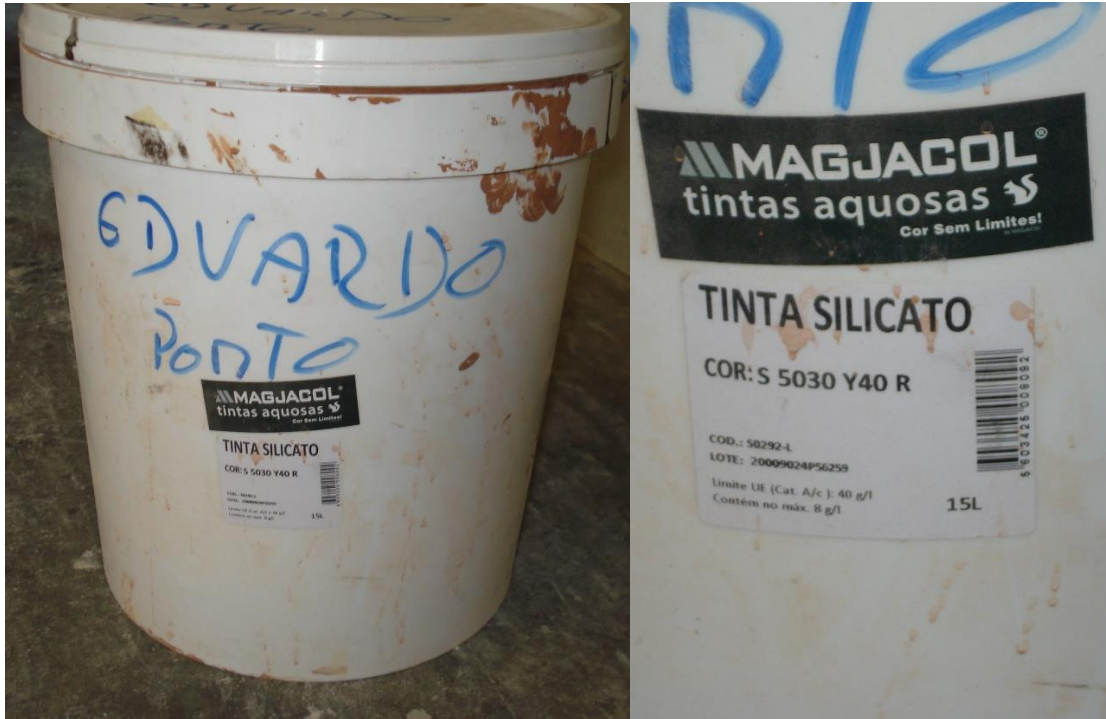


Figura 4.5 – Tinta de silicato utilizada nos ensaios experimentais [fotos do autor].

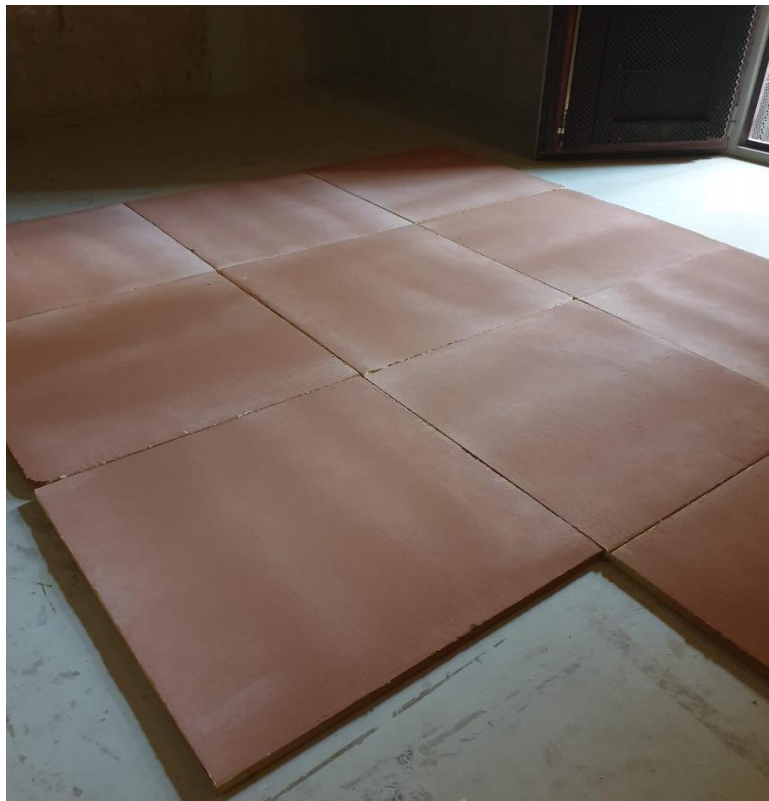


Figura 4.6 – Disposição das placas de Sonacoustic® ALM no piso da câmara reverberante para a realização do ensaio após pintura [foto do autor].



Figura 4.7 – Pormenor de um painel da amostra de *Sonacoustic® ALM*, onde é visível a massa de barramento antes de qualquer processo (esq.) e após pintura (dir.) [fotos do autor].

4.2.2. LÃ MINERAL *ISOVER*

De forma a estudar o efeito do barramento superficial *ALM* na solução de *Sonacoustic® ALM*, foram ensaiadas as amostras “viradas do avesso”, ou seja, com a lã mineral de marca *ISOVER* exposta (virada para cima), podendo assim avaliar a absorção sonora deste tipo de solução sem a presença de barramento e o seu consequente efeito acústico no sistema (Figura 4.8).

O processo de ensaios foi semelhante ao das amostras com barramento superficial. Procedeu-se à limpeza das mesmas e de seguida foi aplicado uma camada de tinta de silicato acastanhada com *spray* de pintura (Figura 4.9) com as mesmas características dos ensaios anteriores (Figura 4.6). O processo de secagem foi semelhante ao anterior, realizando-se todos os ensaios das amostras com pintura no mesmo dia (Figura 4.10).

Na Figura 4.11 é possível observar um pormenor da superfície de lã mineral sem pintura e após pintura.



Figura 4.8 – Disposição das placas de *Sonacoustic® ALM* expostas (viradas do avesso) no piso da câmara reverberante para a realização do ensaio da lã mineral *ISOVER* sem pintura [foto do autor].



Figura 4.9 – Realização do processo de pintura à *spray* da amostra de lã mineral *ISOVER* [foto do autor].



Figura 4.10 – Disposição das placas de *Sonacoustic® ALM* expostas (viradas do avesso) no piso da câmara reverberante para a realização do ensaio da lã mineral *ISOVER* após pintura [foto do autor].



Figura 4.11 – Pormenor de um painel da amostra de lã mineral *ISOVER* sem pintura (esq.) e com pintura (dir.) [fotos do autor].

5

RESULTADOS

5.1. SONACOUSTIC® ALM

5.1.1. RESULTADO AMOSTRAS

Os valores do coeficiente de absorção sonora (α_s) obtidos através dos ensaios realizados às amostras novas e antigas de *Sonacoustic® ALM* antes e após aplicação da pintura com pistola (*spray*), assim como, os tempos de reverberação obtidos podem ser observados no Quadro 5.1.

Na Figura 5.1 é possível observar os resultados obtidos para os valores de coeficientes de absorção sonora (α_s) para as amostras de *Sonacoustic® ALM* novas, antes e após aplicação da pintura.

Uma curiosidade de realçar é o facto de os resultados das amostras novas serem muito inferiores aos apresentados pelo fabricante no catálogo (exceto em baixa frequência). Tal pode ser devido às amostras ao facto da lã mineral utilizada nos resultados do fabricante (catálogo) ter a massa volúmica de 96 kg/m^3 e a do sistema ensaiado 120 kg/m^3 , esta diferença de 25% de massa volúmica pode ter influenciado também negativamente os resultados visto que os poros da lã mineral da amostra ensaiada serem mais fechados, dificultando assim a penetração do som na mesma (Figura 5.2).

Pela análise da Figura 5.1, a aplicação de pintura influenciou os resultados de forma geral positivamente com exceção das frequências mais baixas que sofreram uma ligeira diminuição de capacidade de absorção sonora, este melhoramento deve-se provavelmente ao facto de ter existido uma limpeza antes da aplicação da pintura e, visto que a tinta foi aplicada a *spray* (tinta mais aquosa) a mesma pode ter ajudado no processo de limpeza e desobstruído alguns poros assim como diluir alguma sujidade superficial.

Na Figura 5.1, é possível observar que as amostras antigas de *Sonacoustic® ALM* apresentam melhor comportamento acústico do que as novas, uma possível explicação para o sucedido é que o “tempo” vá desgastando o barramento e o vá tornando mais desagregado e com mais poros, melhorando assim a sua absorção sonora.

Quadro 5.1 – Valores dos tempos de reverberação e dos coeficientes de absorção sonora (α_s) das amostras antigas de *Sonacoustic® ALM* antes e após aplicação da pintura com pistola (spray), assim como os coeficientes de absorção sonora (α_s) de *Sonacoustic® ALM* novas e de catálogo.

Sonacoustic® ALM								
	Antiga antes da Pintura			Antiga após a Pintura			Novas	Catálogo
Frequência (Hz)	T1 (s)	T2 (s)	α_s	T1 (s)	T2 (s)	α_s	α_s	α_s
100	16,39	10,24	0,12	16,39	10,35	0,12	0,18	0,16
125	11,53	6,45	0,23	11,53	6,82	0,20	0,19	0,22
160	11,22	4,35	0,48	11,22	4,40	0,47	0,49	0,26
200	10,94	3,85	0,57	10,94	3,84	0,57	0,47	0,35
250	10,22	4,51	0,42	10,22	4,08	0,50	0,35	0,68
315	10,66	4,68	0,41	10,66	4,45	0,44	0,35	0,82
400	11,39	5,23	0,35	11,39	4,91	0,39	0,33	0,99
500	11,31	5,21	0,35	11,31	4,88	0,40	0,30	1,00
630	10,69	4,89	0,38	10,69	4,67	0,41	0,30	1,01
800	9,71	4,49	0,41	9,71	4,24	0,45	0,32	0,96
1000	8,78	3,47	0,59	8,78	3,35	0,63	0,50	1,01
1250	7,81	3,57	0,52	7,81	3,53	0,53	0,47	0,96
1600	6,90	3,85	0,39	6,90	3,70	0,43	0,34	0,96
2000	6,04	3,40	0,44	6,04	3,27	0,48	0,40	0,97
2500	5,37	3,13	0,45	5,37	3,05	0,48	0,42	0,93
3150	4,59	3,07	0,37	4,59	2,91	0,43	0,36	0,93
4000	3,59	2,62	0,35	3,59	2,52	0,40	0,30	0,89
5000	2,82	2,24	0,31	2,82	2,09	0,42	0,27	0,89

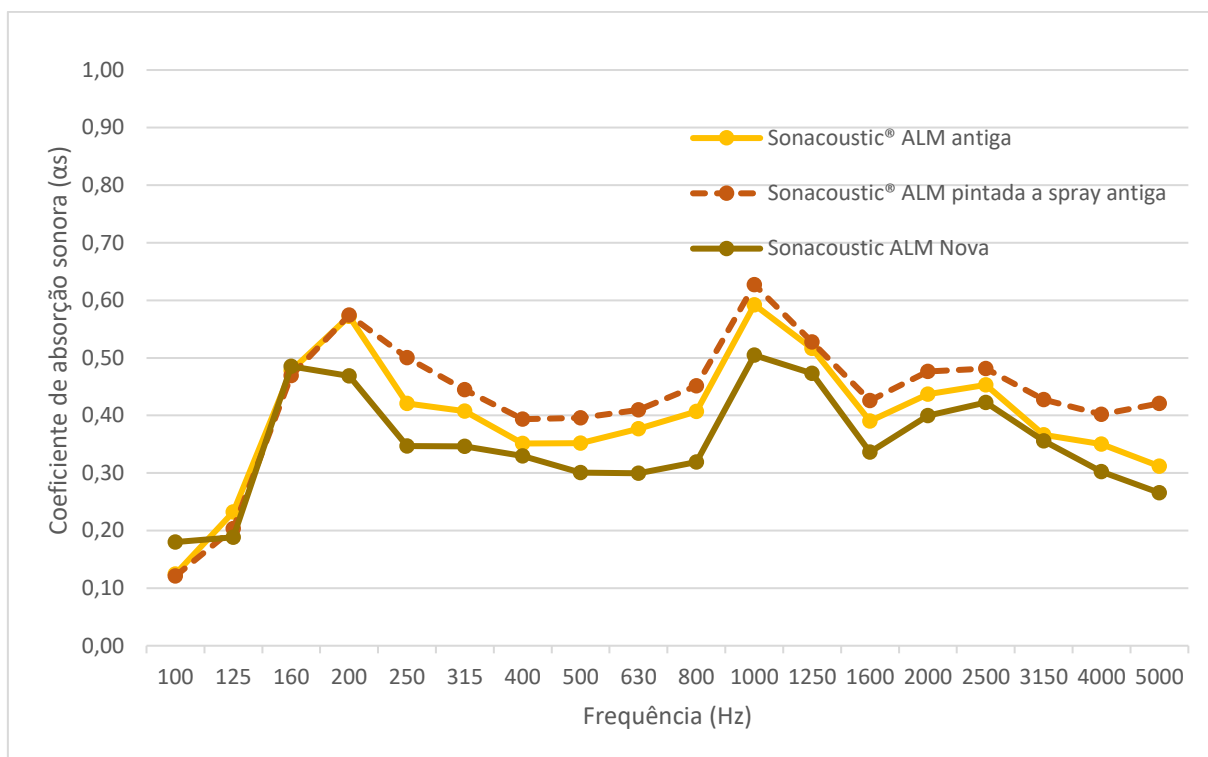


Figura 5.1 – Valores do coeficiente de absorção sonora *Sonacoustic® ALM* nova e antiga *antes* e *após* aplicação da pintura com pistola (*spray*).

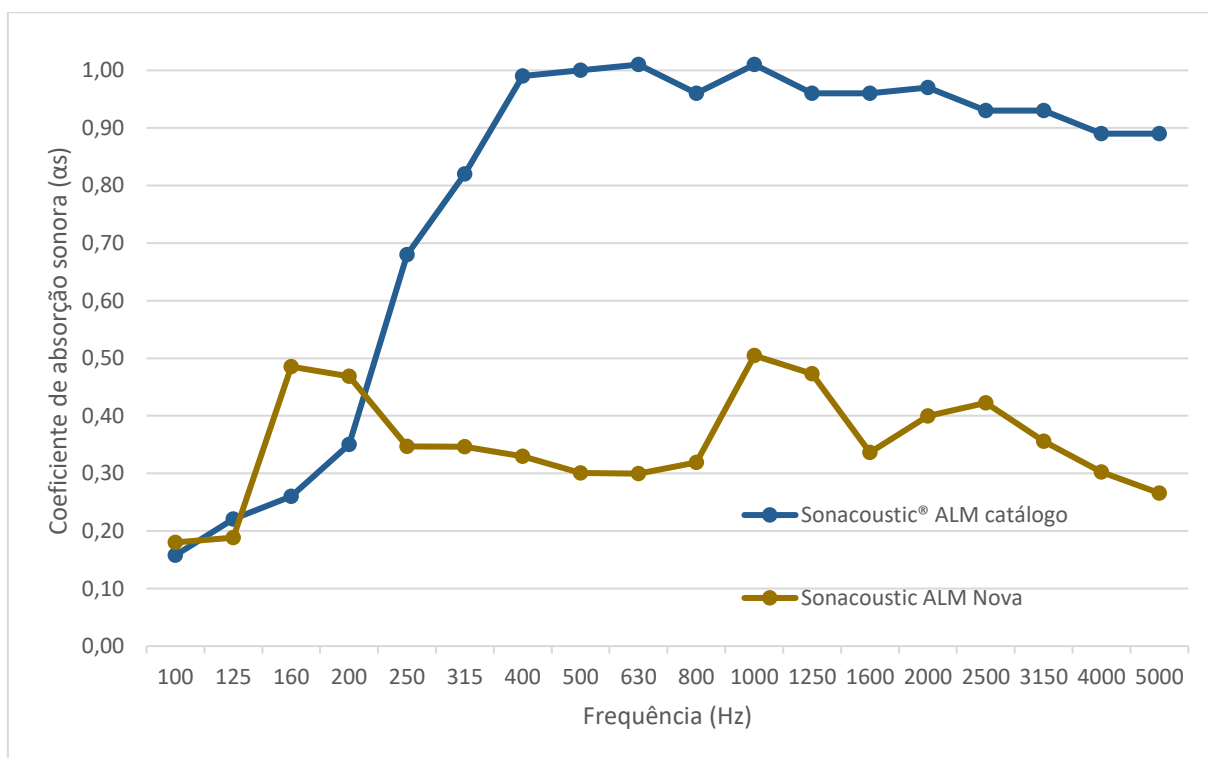


Figura 5.2 – Valores do coeficiente de absorção sonora *Sonacoustic® ALM* nova e de catálogo.

5.1.2. VARIAÇÃO DOS VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DEVIDO AO EFEITO DA TINTA

Avaliando a variação dos valores do coeficiente de absorção sonora presentes no Quadro 5.2 deteta-se um aumento na capacidade de absorção após a pintura por praticamente todo o espectro das frequências. Este aumento deve-se possivelmente à limpeza efetuada com ar comprimido antes de pintar a amostra, assim como a diluição da sujidade provocada pela tinta a *spray*. Existe apenas uma diminuição da capacidade de absorção sonora nas baixas frequências (125 e 160 Hz).

Na Figura 5.3, esta tendência torna-se ainda mais visível apesar de ser relativamente baixa. A diferença de absorção sonora *antes* e *após* a pintura a *spray* é mínima, nas frequências baixas apresentando uma variação mínima de 0,03 prejudicialmente (125 Hz) e nas frequências mais elevadas, uma variação máxima de 0,11 positivamente (5 kHz).

Analisando a questão de forma percentual, na Figura 5.4 é possível observar uma diminuição máxima no coeficiente de absorção sonora na gama de frequência de 125 Hz de 12 % que reflete a diminuição da capacidade absorção sonora nas baixas frequências *após* pintura (100 a 200 Hz), mas, ao longo do espectro das frequências a partir dos 200 Hz, é possível observar um aumento percentual significativo *após* pintura a *spray*, atingindo um máximo de 35% nos 5000 Hz.

Dos resultados obtidos, apesar de se desconfiar que a limpeza com ar comprimido das amostras e o facto de a tinta aquosa ter diluído alguma sujidade, é possível acreditar que se a aplicação da pintura for realizada por método de pistola pouco afeta a eficácia dos sistemas absorventes sonoros, tal como constatou Chrisler, em 1940 [26]. Ele conclui que quando a pintura é realizada com pistola, é possível observar que o efeito negativo na absorção sonora do material é muito reduzido sobretudo nas frequências altas, tal se confirma nos resultados obtidos onde apenas se observa uma ligeira diminuição da absorção sonora nas frequências mais baixas.

Quadro 5.2 – Diferenças entre os valores do coeficiente de absorção sonora ($\Delta\alpha_s = \alpha_s$ após pintura – α_s pré pintura) da amostra antiga de Sonacoustic® ALM, depois e antes da pintura.

Banda de frequência (Hz)	$\Delta\alpha_s$ = α_s depois – α_s antes	Banda de frequência (Hz)	$\Delta\alpha_s$ = α_s depois – α_s antes
100	0,00	800	0,04
125	-0,03	1000	0,04
160	-0,01	1250	0,01
200	0,00	1600	0,04
250	0,08	2000	0,04
315	0,04	2500	0,03
400	0,04	3150	0,06
500	0,04	4000	0,05
630	0,03	5000	0,11

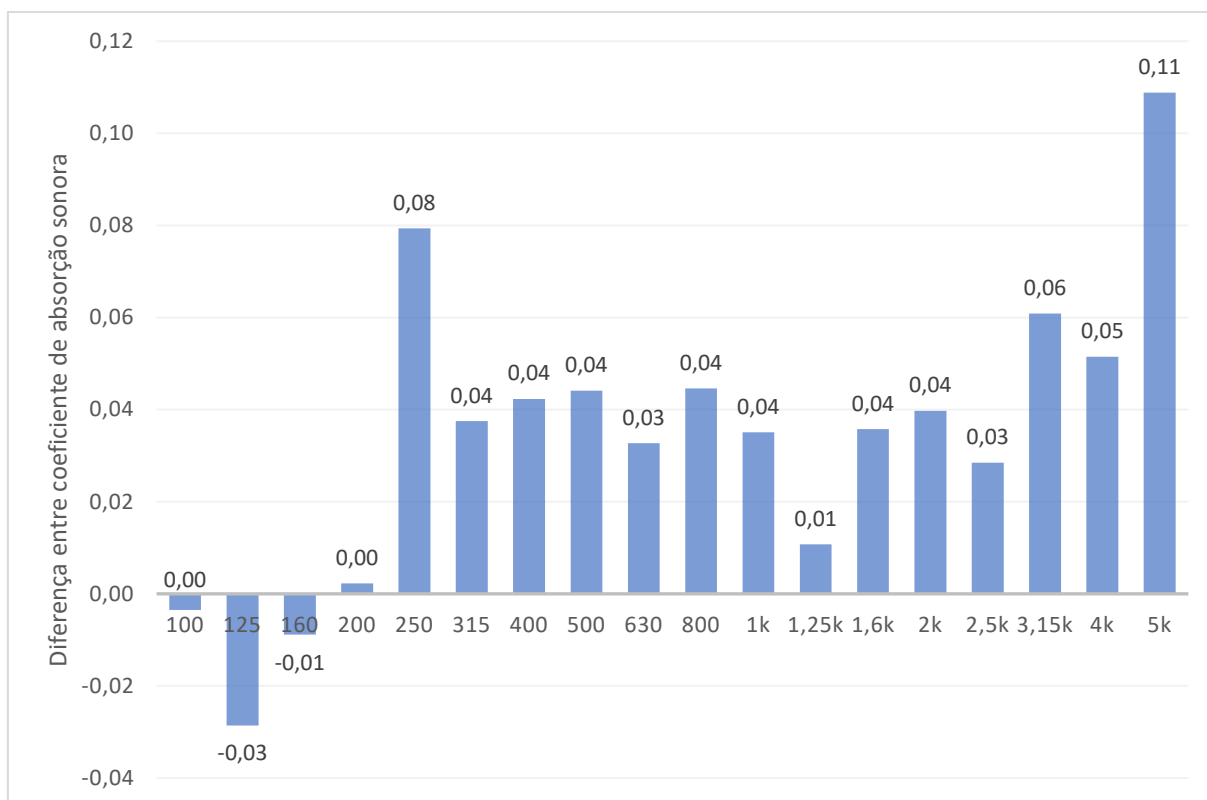


Figura 5.3 – Valores de $\Delta\alpha_s = \alpha_s \text{ após pintura} - \alpha_s \text{ antes pintura}$, nas bandas de frequência de 1/3 de oitava dos 100 aos 5000 Hz da amostra antiga de Sonacoustic® ALM.

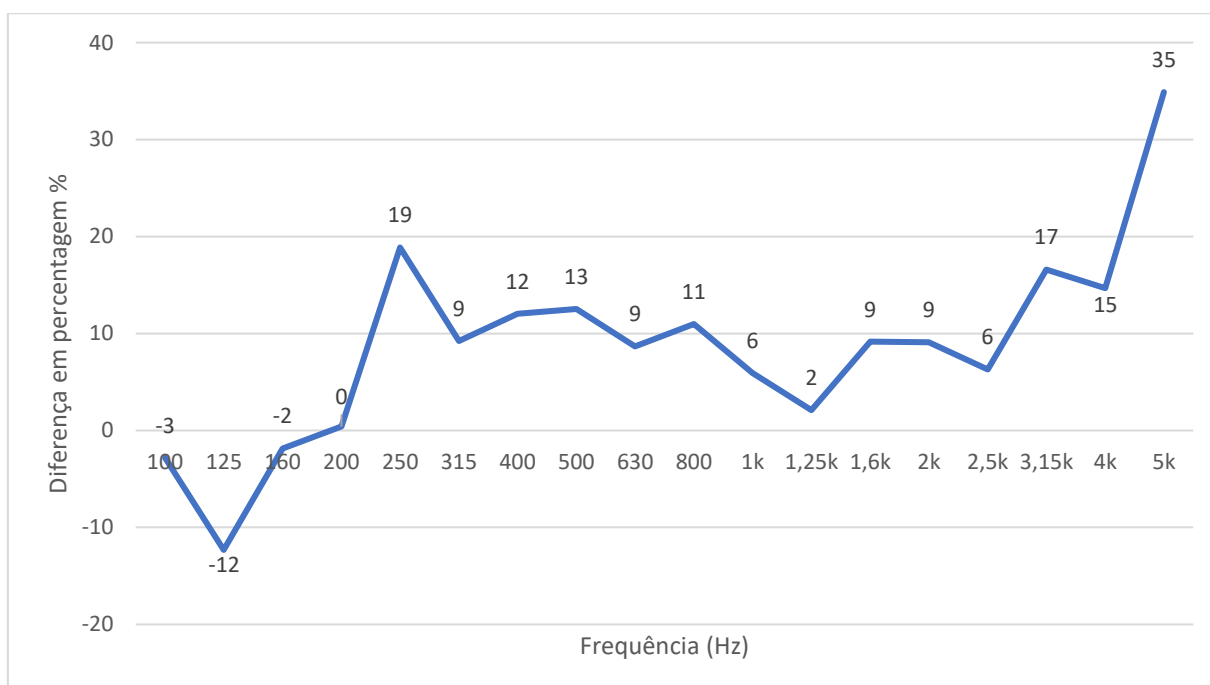


Figura 5.4 – Diferença em percentagem ($\Delta\alpha_{sP} = (\alpha_{sDepois} - \alpha_{sAntes})/\alpha_{sAntes}(\%)$) nos valores do coeficiente de absorção sonora após e antes de pintura na amostra antiga Sonacoustic® ALM.

5.1.3. NRC e α_w

Analisando os valores de NRC e o α_w , de catálogo, novas, antigas antes e após pintura no Quadro 5.3, é possível observar um aumento ligeiro no parâmetro NRC após a pintura da amostra (0,05). O NRC apenas consiste numa média aritmética entre os valores obtidos de α_s nas bandas de oitavas entre 250 e 2000 Hz, sendo que consiste em avaliar a amostra de forma global, mas não engloba as frequências mais elevadas onde se registou um aumento mais significativo da absorção sonora depois de pintura. O α_w manteve-se resultando assim na mesma classe atribuída à amostra.

Analisando o efeito dos cerca de 9 anos de uso da amostra em comparação com amostra nova é possível observar uma diferença significativa na capacidade de absorção sonora das amostras. Este fator possivelmente é resultante dos anos de uso que conduziram a desagregação causando mais poros, melhorando assim a sua absorção sonora.

A diferença de massa volúmica da lã mineral utilizada pode ter influenciado negativamente o processo, visto que a lã mineral ensaiada na FEUP ser 25% mais compacta do que a do catálogo, os poros são menores e permitem assim uma menor penetração do som, resultando num pior desempenho acústico.

Quadro 5.3 – Valores de NRC , α_w e classe da amostra *Sonacoustic® ALM* de catálogo, novas e antiga testada depois e antes da pintura.

	NRC	α_w	Classe
Sonacoustic® ALM antiga antes de pintura	0,45	0,45 (L)	D
Sonacoustic® ALM antiga após pintura	0,50	0,45 (L)	D
Sonacoustic® ALM nova	0,40	0,35 (L)	D
Sonacoustic® ALM catálogo	0,90	0,90	A

5.2. LÃ MINERAL ISOVER

5.2.1. RESULTADO AMOSTRAS

Os valores do coeficiente de absorção sonora (α_s) obtidos através dos ensaios realizados às amostras de lã mineral *ISOVER* (amostra *Sonacoustic® ALM* exposta “virada do avesso” *antes* e *após* aplicação da pintura com pistola (*spray*), assim como, os tempos de reverberação obtidos, podem ser observados no Quadro 5.4.

É possível observar na Figura 5.5 os resultados obtidos para os valores de coeficientes de absorção sonora (α_s) apresentados no Quadro 5.4 dos ensaios para as amostras de lã mineral *ISOVER* *antes* e *após* aplicação da pintura. Pela análise do mesmo, a aplicação de pintura praticamente não influenciou os resultados de capacidade de absorção sonora da amostra.

Quadro 5.4 – Coeficientes de absorção sonora (α_s) das amostras de lã mineral *ISOVER* *antes* e *após* aplicação da pintura com pistola (*spray*) e tempos de reverberação.

Lã Mineral <i>ISOVER</i>	<i>Antes da Pintura</i>			<i>Após a Pintura</i>			
	Frequência (Hz)	T1 (s)	T2 (s)	α_s	T1 (s)	T2 (s)	α_s
100		16,39	12,41	0,07	16,39	11,31	0,09
125		11,53	8,52	0,10	11,53	8,42	0,11
160		11,22	7,42	0,16	11,22	7,38	0,16
200		10,94	6,20	0,24	10,94	6,30	0,23
250		10,22	5,14	0,33	10,22	5,10	0,33
315		10,66	4,00	0,53	10,66	3,95	0,54
400		11,39	3,44	0,69	11,39	3,43	0,69
500		11,31	2,92	0,86	11,31	2,91	0,87
630		10,69	2,61	0,98	10,69	2,59	0,99
800		9,71	2,51	1,00	9,71	2,50	1,01
1000		8,78	2,41	1,02	8,78	2,38	1,04
1250		7,81	2,33	1,02	7,81	2,31	1,04
1600		6,90	2,24	1,02	6,90	2,26	1,01
2000		6,04	2,12	1,04	6,04	2,13	1,03
2500		5,37	2,06	1,02	5,37	2,05	1,02
3150		4,59	1,97	0,98	4,59	1,98	0,98
4000		3,59	1,79	0,95	3,59	1,78	0,96
5000		2,82	1,59	0,93	2,82	1,56	0,97

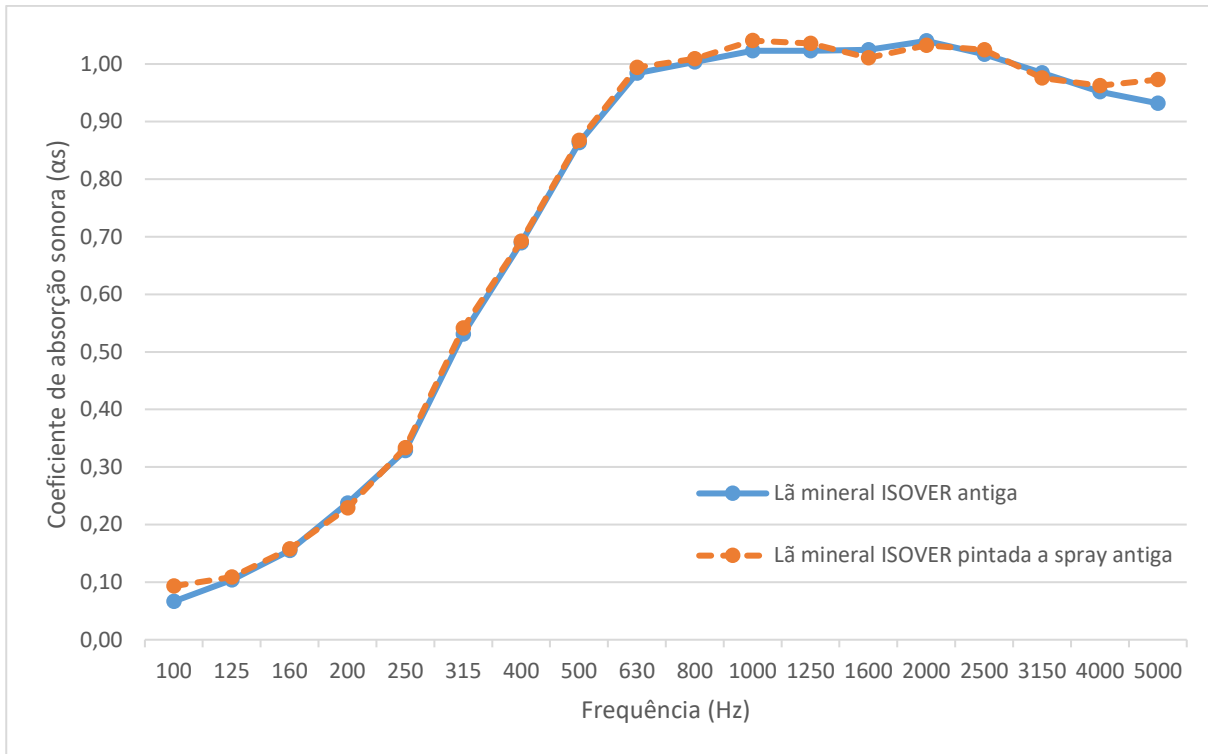


Figura 5.5 – Valores do coeficiente de absorção sonora da lã mineral *ISOVER* antes e após aplicação da pintura com pistola (*spray*).

5.2.2. VARIAÇÃO DOS VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DEVIDO AO EFEITO DA TINTA

Analisando a variação dos valores do coeficiente de absorção sonora presentes no Quadro 5.5 deteta-se uma variação muito pouco significativa ao longo das frequências estudadas. Existe apenas uma diminuição da capacidade de absorção sonora nos 200 Hz de 0,01, dos 1600 aos 2000 Hz de 0,01 e nos 3150 Hz de 0,01, o que torna o efeito negativo da pintura nesta amostra muito pouco significativo. Nas restantes frequências estudadas o efeito foi inverso, resultando num reduzido aumento geral do coeficiente de absorção sonora, com uma variação máxima nos 5000 Hz de 0,04.

O facto de ter sido aplicado apenas uma demão de tinta pode também explicar a diferença pouco significativa nos resultados assim com o facto que, tal como com a amostra de *Sonacoustic® ALM* procedeu-se a uma limpeza superficial com ar comprimido antes da aplicação da tinta, o que pode ter removido parte da sujidade superficial e assim provocado uma melhoria da absorção sonora apesar de ligeira neste tipo de material. Como este material é aplicado diretamente ao teto ficando entre o teto e o barramento superficial, pode também explicar o facto de não ter perdido grandes propriedades ao longo dos anos de uso visto que estava protegido pela camada de barramento superficial.

Na Figura 5.6, a diferença de absorção sonora *antes* e *após* a pintura a *spray* é mínima, apresentando uma variação mínima de 0,01 prejudicialmente (125 Hz, 1,6 kHz, 2 kHz e 3,15 kHz) e uma variação máxima de 0,04 positivamente (5 kHz), o que é muito pouco relevante.

Percentualmente, na Figura 5.7 é possível observar uma diminuição máxima no coeficiente de absorção sonora na gama de frequência de 200 Hz de 4% *após* pintura e ao longo do espectro das frequências um aumento e diminuição pouco significativo *após* pintura a *spray* mantendo-se a maioria dos resultados entre -1% e 2%, de realçar foi uma variação máxima positiva de 40% nos 100 Hz.

Quadro 5.5 – Diferenças entre os valores do coeficiente de absorção sonora ($\Delta\alpha_s = \alpha_s$ após pintura – α_s antes pintura) da amostra de sonora lã mineral *ISOVER*, depois e antes da pintura.

Banda de frequência (Hz)	$\Delta\alpha_s$ = α_s depois – α_s antes	Banda de frequência (Hz)	$\Delta\alpha_s$ = α_s depois – α_s antes
100	0,03	800	0,01
125	0,00	1000	0,02
160	0,00	1250	0,01
200	-0,01	1600	-0,01
250	0,01	2000	-0,01
315	0,01	2500	0,01
400	0,00	3150	-0,01
500	0,00	4000	0,01
630	0,01	5000	0,04

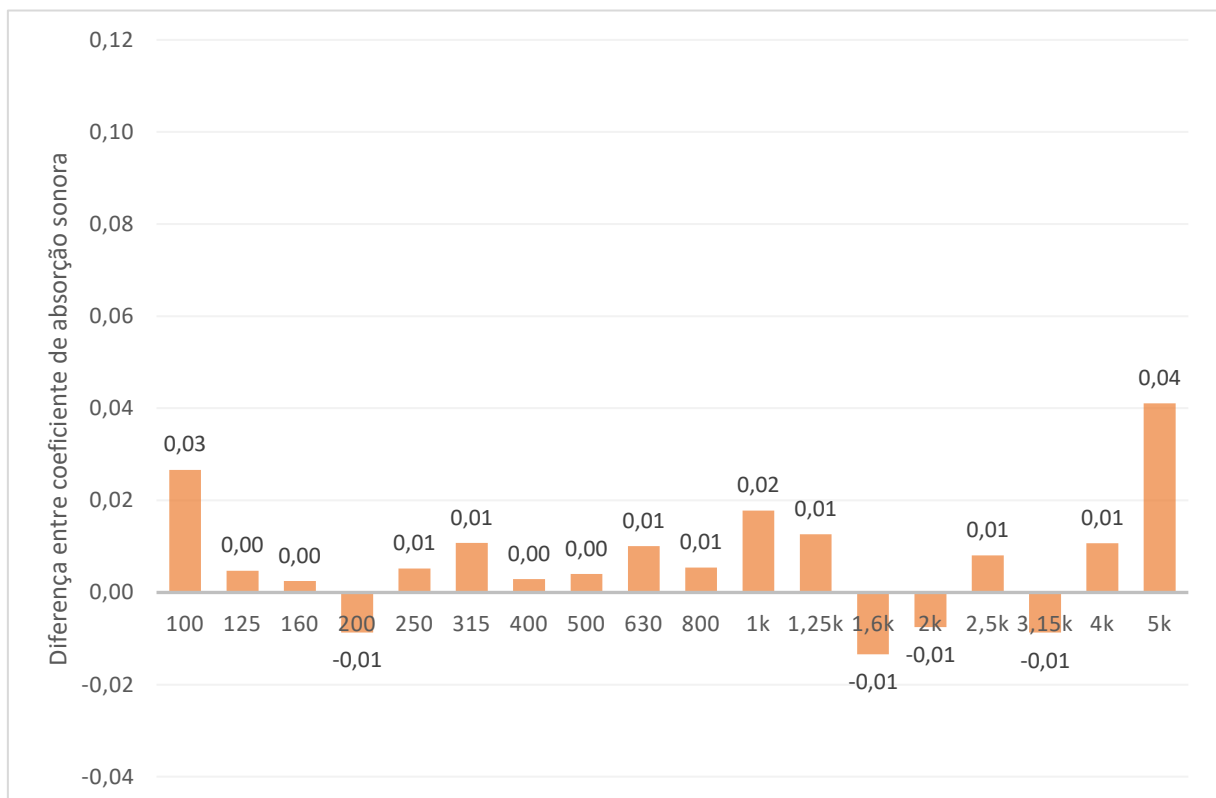


Figura 5.6 – Valores de $\Delta\alpha_s = \alpha_s$ após pintura – α_s antes pintura, nas bandas de frequência de 1/3 de oitava dos 100 aos 5000 Hz da amostra de lã mineral *ISOVER*.

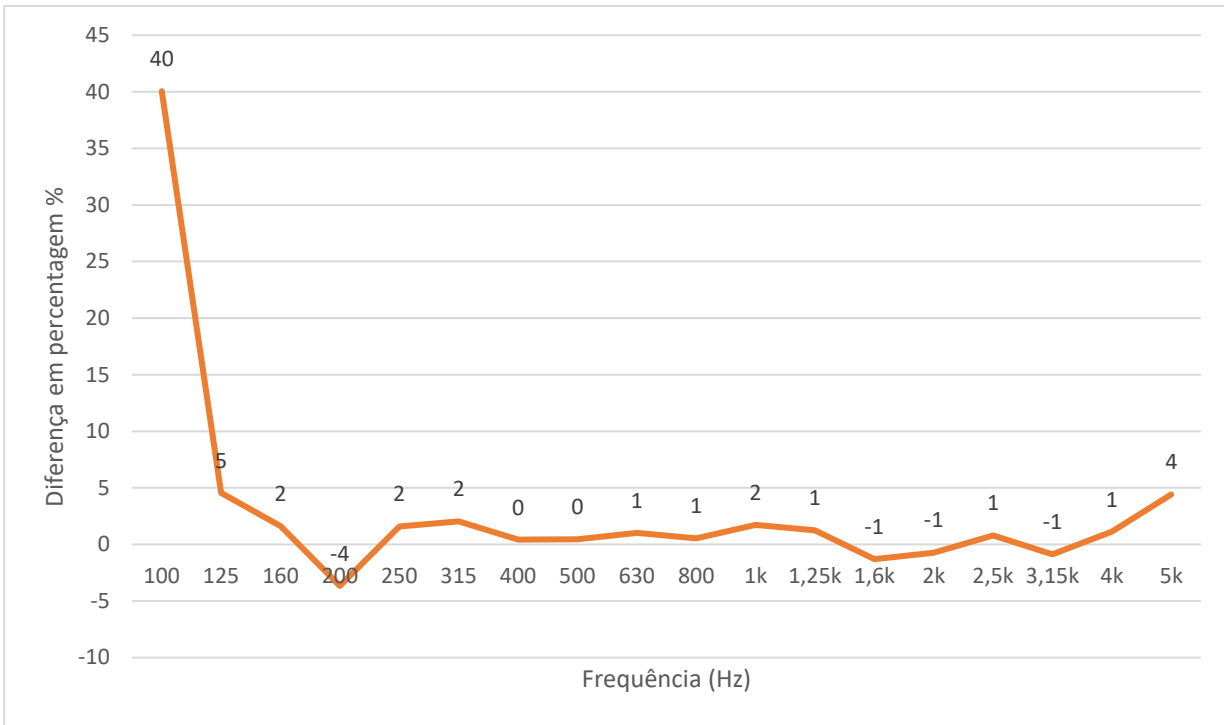


Figura 5.7 – Diferença em porcentagem ($\Delta\alpha_{SP} = (\alpha_{SDepois} - \alpha_{SAntes})/\alpha_{SAntes}(\%)$) entre a capacidade de absorção sonora *após* e *antes* de pintura da amostra de lã mineral ISOVER.

5.2.3. NRC e α_w

No Quadro 5.6 é possível observar os valores de *NRC* e o α_w , *antes* e *após* pintura a spray, a amostra manteve o seu parâmetro *NRC* *após* a pintura. O α_w aumentou devido à camada de pintura a spray aplicada resultando mesmo assim na mesma classe atribuída à amostra.

Estes valores estão quase de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante que indicava um α_w para este tipo de lã de 0,75, apesar dos resultados terem sido inferiores, a pouca diferença deve-se possivelmente aos anos de uso das amostras testadas, não podendo, no entanto, tomar o valor do fabricante como base para este tipo de amostra visto que não se sabe a massa volúmica da lã mineral utilizada pelo fabricante na ficha técnica do material.

Quadro 5.6 – Valores de *NRC*, α_w e classe da amostra Lã Mineral ISOVER 30mm, *depois* e *antes* da pintura.

	NRC	α_w	Classe
Lã Mineral ISOVER antes de pintura	0,80	0,65 (MH)	C
Lã Mineral ISOVER após pintura	0,80	0,70 (MH)	C

5.3. EFEITO DO BARRAMENTO SUPERFICIAL APÓS ANOS DE UTILIZAÇÃO

Pode ser analisado na Figura 5.8 o efeito do barramento superficial na lã mineral *ISOVER* (barramento *ALM*) de modo a criar a solução *Sonacoustic® ALM*. É possível observar que o barramento superficial piora de forma significativa a absorção sonora da solução. Esta diferença de desempenho elevada deve-se ao facto da lã mineral *ISOVER* ter melhor comportamento acústico do que o barramento e, portanto, do que a solução em si.

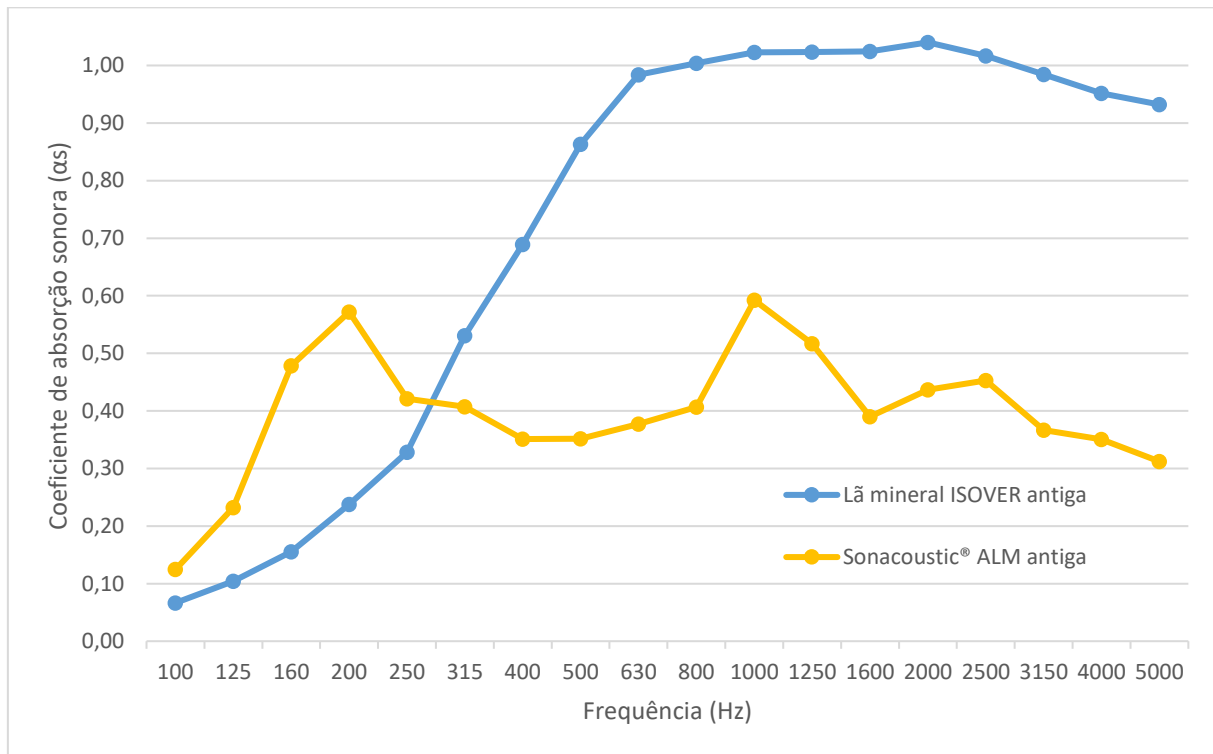


Figura 5.8 – Valores do coeficiente de absorção sonora da solução *Sonacoustic® ALM* em comparação com a lã mineral *ISOVER*.

No Quadro 5.7 assim como na Figura 5.9, é possível observar que a solução *Sonacoustic® ALM* usada apenas apresenta maiores valores de coeficiente de absorção sonora nas frequências mais baixas (100 aos 250 Hz). No restante espectro das frequências ensaiadas a situação é invertida, tendo a lã mineral *ISOVER* maiores valores de coeficiente de absorção sonora. Esta diferença de valores apresenta um máximo positivo nas frequências mais baixas nos 200 Hz de 0,33 e um máximo negativo nos 1,6 kHz de -0,63.

Percentualmente na Figura 5.10 é possível observar essa tendência em que a solução *Sonacoustic® ALM* usada apresenta valores muito mais elevados nas frequências baixas sendo esses valores em comparação com a lã mineral *ISOVER* usada 123% maiores nos 125 Hz, 208% nos 160 Hz e 141% nos 200 Hz, existe uma grande diferença de absorção sonora nessa gama de frequências. A partir dos 315 Hz a situação inverte-se e a lã mineral *ISOVER* apresenta valores percentuais maiores na ordem dos 60% ao longo das restantes frequências ensaiadas.

Quadro 5.7 – Diferenças entre os valores do coeficiente de absorção sonora ($\Delta\alpha_s$) da amostra completa antiga de *Sonacoustic® ALM* e unicamente da lã mineral *ISOVER*.

Banda de frequência (Hz)	$\Delta\alpha_s$ = α_s <i>sona.</i> - α_s <i>isover</i>	Banda de frequência (Hz)	$\Delta\alpha_s$ = α_s <i>sona.</i> - α_s <i>isover</i>
100	0,06	800	-0,60
125	0,13	1000	-0,43
160	0,32	1250	-0,51
200	0,33	1600	-0,63
250	0,09	2000	-0,60
315	-0,12	2500	-0,56
400	-0,34	3150	-0,62
500	-0,51	4000	-0,60
630	-0,61	5000	-0,62

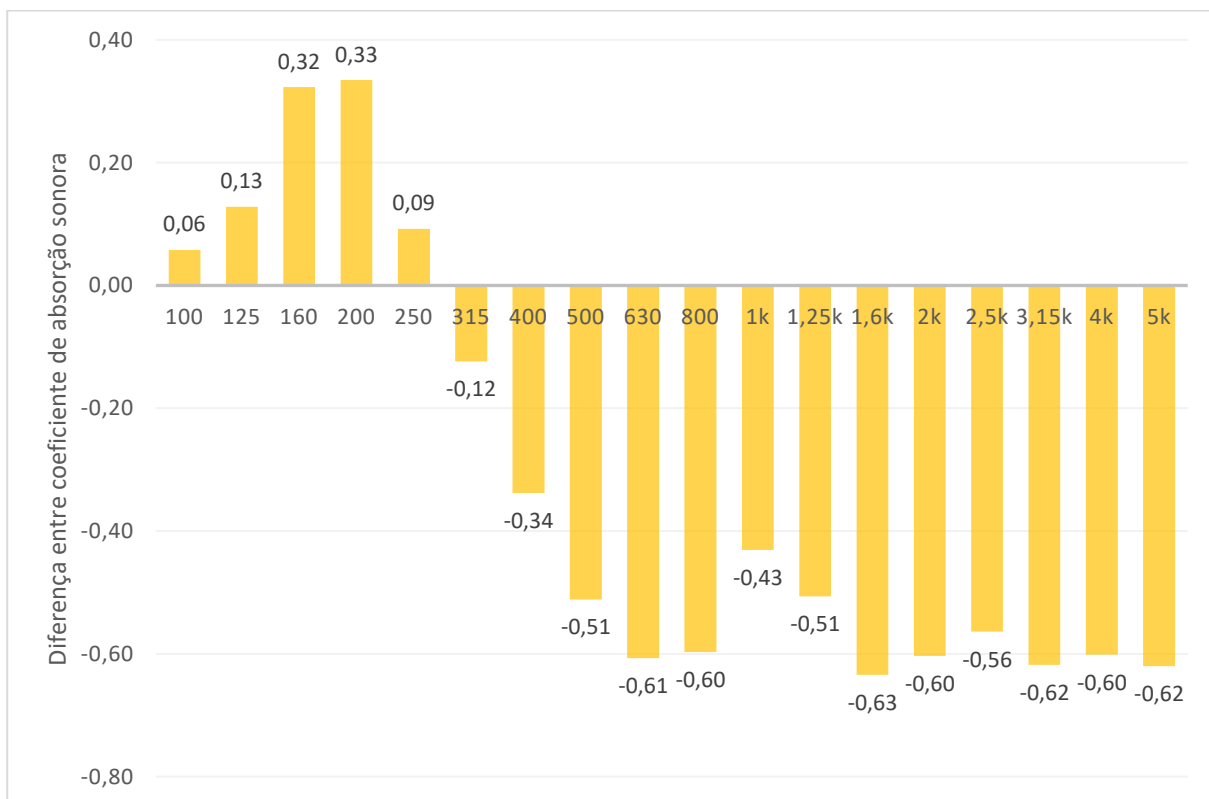


Figura 5.9 – Valores de $\Delta\alpha_s = \alpha_s$ *Sonacoustic® ALM* - α_s lã mineral *ISOVER*, nas bandas de frequência de 1/3 de oitava dos 100 aos 5000 Hz.

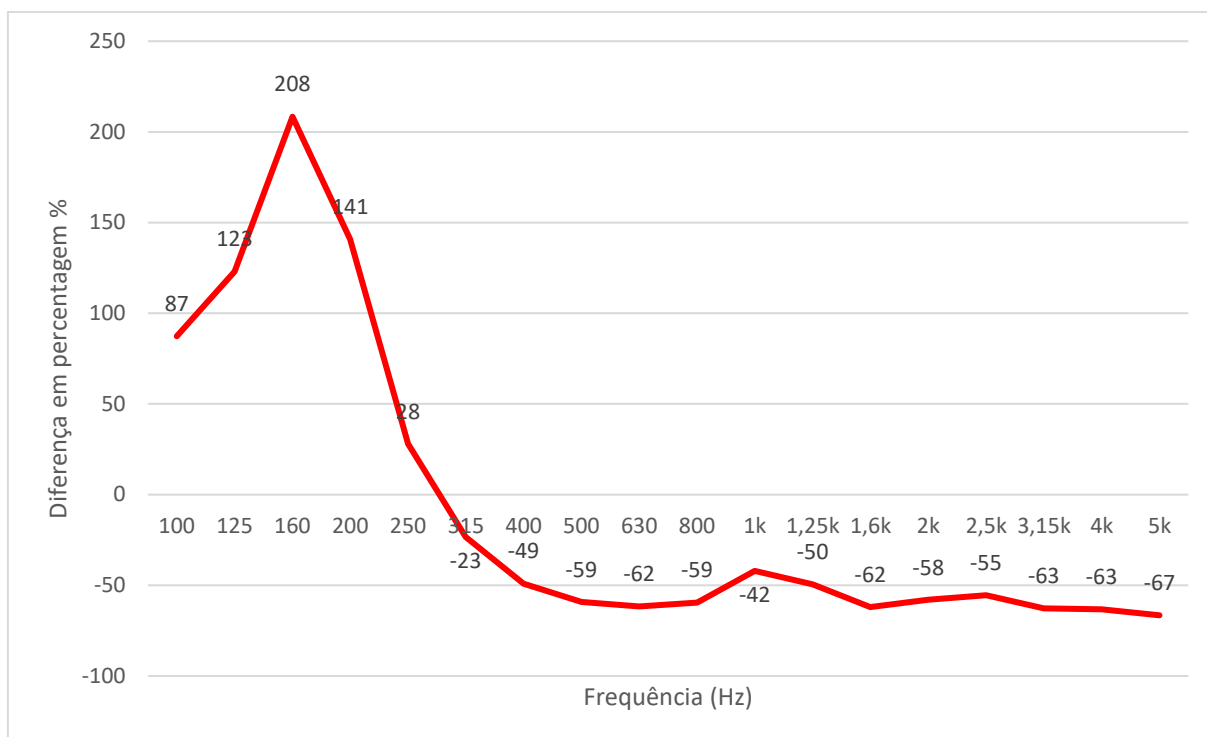


Figura 5.10 – Diferença em porcentagem ($\Delta\alpha_{sp} = (\alpha_{sDepois} - \alpha_{sAntes})/\alpha_{sAntes}(\%)$) entre a capacidade de absorção sonora da solução completa de *Sonacoustic® ALM* em comparação com unicamente a lã mineral *ISOVER 30 mm*.

No Quadro 5.8 estão apresentados os valores de *NRC*, α_w e *classe* das duas soluções, confirmando assim o resultado esperado decorrido da análise das figuras anteriores, tendo a solução com o barramento superficial pior desempenho segundo esses parâmetros.

Quadro 5.8 – Valores de *NRC*, α_w e *classe* da amostra lã mineral *ISOVER 30 mm* e *Sonacoustic® ALM*

	NRC	α_w	Classe
<i>Sonacoustic® ALM antiga</i>	0,45	0,45 (L)	D
Lã Mineral <i>ISOVER 30mm</i>	0,80	0,65 (MH)	C
Varição (= sona. – isover)	-0.35	-0.20	-1 classe

6

CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES GLOBAIS

O objetivo do presente documento foi analisar o efeito de anos de uso e o efeito que a pintura pode provocar num tipo específico de sistema absorvente sonoro. Foram estudadas amostras cedidas pela *STIER* (sistema absorvente *Sonacoustic® ALM*) umas após terem estado cerca de 9 anos aplicadas na estação do metro do Porto *Campo 24 de Agosto* e outras semelhantes, mas totalmente novas. Os ensaios consistiram em avaliar a variação da capacidade de absorção sonora das amostras após anos de utilização assim como em quantificar o possível efeito da pintura *antes* e *depois* da aplicação com pistola de pintura. Foi assim possível estudar o comportamento do sistema em si, a sua composição, os seus parâmetros e o efeito que o barramento superficial que o mesmo apresenta se comporta após vários anos de utilização.

Da avaliação dos resultados obtidos é possível concluir que os anos de utilização, neste tipo de sistema absorvente sonoro, em pouca afeta a sua capacidade ao longo do tempo de manter as suas boas características de absorção sonora e podem até melhorá-las. Os valores obtidos para as amostras após cerca de 9 anos de uso não perderam praticamente nada da sua absorção sonora original, até melhoraram um pouco.

Comparando os resultados com os valores em catálogo surgiram grandes diferenças (os valores dos coeficientes de absorção sonora em catálogo são cerca do dobro dos valores obtidos com as amostras retiradas após 9 anos de uso). Contudo, as amostras fornecidas foram produzidas com uma lã mineral de diferente massa volúmica (120 kg/m^3) que aquelas apresentadas em catálogo (96 kg/m^3), assim como com uma diferença de espessura de aproximadamente 4 mm o que pode explicar as diferenças encontradas.

Este tipo de sistema absorvente sonoro também varia bastante de obra para obra visto que o barramento é aplicado posteriormente à colagem da lã mineral, fazendo assim variar os valores. A própria mistura para obter a camada de barramento pode variar dependendo do aplicador e da mistura para obter a consistência correta para a obra em curso. Isso pode ter sido mais um fator causando a discrepância de valores entre as amostras novas e de catálogo.

Sendo os valores de catálogo de tal forma diferentes dos das amostras novas, o fabricante deveria talvez criar ou nomear o sistema de outra forma, visto que não cumpre exatamente com os valores anunciados, ou controlar exatamente o processo de fabricação de solução todo de forma que os valores das amostras aplicadas estejam integralmente de acordo com os valores de catálogo.

Em relação à pintura a *spray* pode-se considerar praticamente nulo o seu efeito se for aplicada apenas uma camada, como foi o caso deste estudo. A aplicação da pintura com pistola em nada piorou os resultados obtidos e até melhorou de forma geral os mesmos. Tal melhoramento deve-se possivelmente à limpeza com ar comprimido das amostras feita antes da aplicação da pintura. Tal conclusão já tinha sido obtida em 1940 por Chrisler [26] em que conclui que quando a pintura é realizada com pistola, é possível observar que o efeito negativo na absorção sonora do material é muito reduzido sobretudo em altas frequências. O mesmo se confirma nos resultados agora obtidos onde apenas se observa uma ligeira diminuição da absorção sonora nas frequências mais baixas. No estudo realizado em 1940 foram aplicadas sete demãos, o que reforça a teoria que o método de aplicação de pintura a *spray* em pouco ou nada afeta a capacidade de absorção sonora das amostras com características absorventes sonoras. Esta conclusão permite que exista um compromisso entre um bom sistema absorvente sonoro ou revestimento poroso por absorção sonora e um ambiente moldado esteticamente a nível de cores com a situação específica em si, evitando assim, muito debate de ter de se comprometer o funcional para ter o esteticamente mais agradável.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Este trabalho permitiu realçar alguns aspetos que já foram concluídos em estudos anteriores e acrescentar novos desenvolvimentos sobre o assunto. Apesar deste documento ter tido como foco principal inicial apenas a medição do efeito da pintura em diversos revestimentos porosos para absorção sonora, acabou devido as circunstâncias e oportunidades também, analisar o efeito dos anos de utilização neste tipo de sistema absorvente sonoro.

Devido à falta de mais amostras e de tempo, não foi possível criar um documento mais detalhado e mais conclusivo. Deste modo para uma análise futura mais aprofundada sobre o assunto seguem algumas recomendações no desenvolvimento deste tema.

Num estudo futuro seria importante testar vários sistemas sonoros e comparar o comportamento dos mesmos em relação ao comportamento obtido durante a realização deste documento.

Seria também interessante testar um sistema absorvente sonoro, mas com vários anos de uso de diferença entre eles, de forma a avaliar e mesmo criar um modelo matemático para o sistema estudado sobre a sua perda ou ganho de capacidade de absorção sonora com o tempo decorrido, assim como a criação de uma possível solução de manutenção que retardaria ou melhoraria o processo de absorção sonora.

Este estudo baseou-se em apenas num tipo de tinta aquosa e foi apenas aplicada uma demão com pistola de pintura. Seria importante avaliar também até quantas demãos ou mesmo se o tipo de tinta usada na pintura a *spray* afetaria a amostra em causa mais gravemente, assim como a comparação da pintura à *spray* com outro método de aplicação de pintura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, A.P.O. *Acústica Ambiental e de Edifícios*. FEUP, Porto, 2019.
- [2] Galvan, M. *Harmonics and Sound*. 2017. <https://www.marcogalvan.com/2017/03/harmonics-and-sound.html>. Acedido em 22/02/2021.
- [3] Pietquin, D. *Sources Sonores*. 2007. <http://www.techniquesduson.com/sourcessonores.html>. Acedido em 24/02/2021.
- [4] Oliveira, A. *Ruído Laboral: Parâmetros de Descrição do Som*. <https://www.apopartner.pt/ruído-laboral-parametros-de-descricao-do-som/>. Acedido em 25/02/2021.
- [5] Pietquin, D. *Timbre et Fréquence : Fondamentale et Harmoniques*. 2008. <http://www.techniquesduson.com/timbre.html>. Acedido em 26/02/2021.
- [6] Croce, B. *Conceitos Básicos da Acústica – PARTE II*. 2019. <http://portalacustica.info/conceitos-basicos-da-acustica-parte-ii/>. Acedido em 26/02/2021.
- [7] *Acoustics Terminologies*, <http://www.alfaacoustics.com/sound-absorption-coefficient.html>. Acedido em 28/02/2021.
- [8] Cox, T.J. e D'António, P. *Acoustic Absorbers and Diffusers – Theory, Design and Application*, Spon Press, Londres, 2004.
- [9] *Phénomènes Physiques*. <https://sites.google.com/site/sfagabe/themes/acoustique-de-l-environnement/propagation-acoustique-en-milieu-exterieur/phenomenes-physiques>. Acedido em 28/02/2021.
- [10] Aranha, R.V. *Análise Técnica Via Tubo de Impedância e Estudo Sustentável da Lã de Pet como Substituta de Materiais Comerciais em Aplicações Acústicas*. UFRGS, Brasil, 2019.
- [11] *Wood Wool Ceiling Baffle HERADESIGN® Baffle basic*, <https://www.knaufceilingsolutions.com/en/products/heradesign-baffle-basic/>. Acedido em 02/03/2021.
- [12] Henrique, L.L. *Acústica Musical*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2002.
- [13] Morse, P.M., Bolt, R.H. e Brown, R.L. *Acoustic Impedance and Sound Absorption*, Journal of the Acoustical Society of America, 1940.
- [14] Sousa, M.R.M. *Efeito do tamanho da amostra em ensaios laboratoriais de absorção sonora*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, 2016.
- [15] Bolt, R.H. *On the design of Perforated Facings for Acoustic Materials*, Journal of the Acoustical Society of America, 1947.
- [16] London, A. *The determination of Reverberant Sound Absorption Coefficients from Acoustic Impedance Measurements*, Journal of the Acoustical Society of America, 1950.
- [17] Kinsler, L.E. *et al. Fundamentals of Acoustics – 3rd Ed.*, John Wiley & Sons, Inc., Nova Iorque, 1982.
- [18] Sacerdote, G.G. e Gigli, A. *Absorption of Sound by Resonant Panels*, Journal of the Acoustical Society of America, 1951.
- [19] Ingard, K.U. e Bolt, R.H. *Absorption Characteristics of Acoustic Materials with Perforated Facings*, Journal of the Acoustical Society of America, 1951.
- [20] Beranek, L.L. *Acoustics*, McGraw-Hill, Nova Iorque, 1954.

- [21] Silva, P.M. *Acústica de Edifícios*, LNEC, Lisboa, 1978.
- [22] Silva, P.M. *Condicionamento Acústico de Edifícios – Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros*, LNEC, Lisboa, 1984.
- [23] Meisser, M. *La Correction Acoustique des Locaux*, CATED, Paris, 1986.
- [24] Domingues, O. *A Acústica nos Edifícios – Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros*, LNEC, Lisboa, 2005.
- [25] Chrisler, V.L. *Effect of Paint on the Sound Absorption of Acoustic Materials*, Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 24, 1940.
- [26] Magalhães, J.C.S. *Efeito da Pintura na Absorção Sonora de Materiais Absorventes Sonoros*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, 2020.
- [27] NP EN ISO 354: 2007, *Acústica; Medição da Absorção Sonora em Câmara Reverberante*.
- [28] NP ISO 9613-1: 2014, *Acústica; Atenuação do Som na sua Propagação ao Ar Livre; Parte 1: Cálculo da absorção atmosférica*.
- [29] *Ficha técnica Sonacoustic® ALM*, S.T.I.E.R. Divisão de Engenharia Acústica, Palmela.
- [30] *Geluidabsorptiemeting Volgens ISO 354:2003(E)*, Kees van Dorsser laboratorium (LBP|SIGHT), Holanda, 2017.