

EFEITO DA PINTURA NA ABSORÇÃO SONORA DE MATERIAIS ABSORVENTES SONOROS

JOÃO CARLOS DE SÁ MAGALHÃES

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

Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2020

Versão para discussão

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2019/2020

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

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

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

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

AGRADECIMENTOS

No culminar desta dissertação, que felizmente coincide com o culminar do meu percurso académico de cinco anos, sinto que devo agradecer a várias pessoas e entidades que não só me ajudaram a desenvolver a presente tese, mas também que me acompanharam durante a integralidade do curso.

Em primeiro lugar, gostava de agradecer ao Professor António Pedro Carvalho, o meu orientador, por toda a ajuda que me prestou a sua disponibilidade e por aguentado com todos os erros que cometi durante o desenvolvimento deste trabalho.

De maneira similar, gostava de agradecer ao Engenheiro António Eduardo Costa que me acompanhou durante os ensaios e que me ajudou na realização destes.

À ACC – *Amorim Cork Composites*, mais em específico ao Engenheiro Eduardo Soares e à Engenheira Susana Silva, por não só fornecerem as amostras de aglomerado composto de cortiça ensaiado nesta dissertação, mas também pela ajuda fornecida após a realização dos testes.

Também à STIER que amavelmente aceitou juntar-se ao desenvolvimento deste estudo, fornecendo amostras para estudo bem como os meios e pessoal para a pintura dessa amostra segundo as suas especificações técnicas.

Aos meus amigos, que fiz ao entrar na faculdade e que me acompanharam durante estes cinco anos nos altos e baixos da vida e que nunca me faltaram em nenhuma ocasião.

Por último, mas não os menos importantes, pelo contrário, quero agradecer aos meus pais e irmã que foram e sempre serão os meus ídolos e exemplos a seguir.

RESUMO

A Acústica é uma disciplina importantíssima para o bom desempenho de um espaço. Infelizmente, esta não só é dominada por poucos como a qualidade acústica de uma divisão, sala de espetáculos ou igreja, depende da Arquitetura desta. Por vezes é preciso proceder à correção do comportamento acústico da sala utilizando materiais absorventes sonoros (ex: Porosos e fibrosos, Ressonadores e Membranas) mas a aplicação destes pode estragar a estética da sala, podendo-se ter de vir pintar ou modificar a aparência dos mesmos.

Nos materiais porosos e fibrosos, dos quais os aglomerados de cortiça fazem parte, a absorção sonora que estes proporcionam advém da existência de poros e interstícios. Quando as ondas que constituem o som atingem os materiais fibrosos, estas perdem parte da sua energia no movimento das fibras que oferecem resistência entre elas, gerando calor.

A eficiência destes materiais absorventes sonoros está intrinsecamente ligada à capacidade destes poros dissiparem a energia. Como tal, o preenchimento destes poros pode ser prejudicial ao seu comportamento acústico.

O estudo do comportamento destes materiais texturados quando a sua superfície é coberta, seja por tinta quando pintados ou quando são cobertos por outras decorações, é importante não só para os utilizadores, que podem desconhecer o impacto negativo de tais práticas, mas também para as empresas produtoras dos absorventes, que beneficiam do estudo destas interações, podendo vir a aumentar a sua gama de produtos, adaptando estes mais facilmente às exigências Arquitetónicas.

Neste sentido, o presente trabalho pretende analisar o efeito da aplicação de tinta em materiais absorventes sonoros. Para tal, efetuou-se vários ensaios em amostras de aglomerado composto de cortiça e fibras minerais (BASWAphon), antes e depois de pintar a superfície destes. Nos ensaios, quantificou-se a influência da pintura através da variação dos valores do coeficiente de absorção sonora (α_s), medido em câmara reverberante seguindo-se a metodologia estabelecida na norma NP EN ISO 354.

No pior dos casos, notou-se uma diminuição dos valores de α_s de 0,26 na banda de frequências de 3,150 kHz no caso das amostras de aglomerado composto de cortiça e de 0,60 na banda de frequências de 2 kHz para a amostra de *BASWAphon Fine 30 mm*.

Concluiu-se então que a aplicação da tinta não só levou à diminuição dos valores de α_s nas altas frequências, mas também levou à movimentação da zona de maior eficácia de absorção sonora para bandas de frequência mais baixas. No entanto no caso de amostras de “maus” absorventes sonoros é possível ocorrer o efeito oposto, quanto estes são pintados, melhorando o seu comportamento sonoro. A pintura poderá também ter efeitos benéficos quando aplicada em absorventes sonoros cuja zona de maior eficácia se encontra em bandas de 1/3 de oitava maiores que 5000 Hz.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Porosos, Tinta, Cortiça, Coeficiente de absorção sonora.

ABSTRACT

Acoustics is a very important discipline for the good performance of a space. Unfortunately, this subject is not only mastered by a few, but the acoustic quality of a room, concert hall or church depends on its architecture. Sometimes it is necessary to correct the acoustic behaviour of the room using sound absorbent materials (e.g. Porous and fibrous, Resonators and Membranes) but the application of these may spoil the aesthetics of the room, leaving no choice but to paint or modify their appearance.

In porous and fibrous materials, of which cork agglomerates are a part, the sound absorption they provide comes from the existence of pores and interstices. When the waves that make up the sound hit fibrous materials, they lose part of their energy in the movement of the fibers that offer resistance between them, generating heat.

The efficiency of this absorbents is intrinsically linked to the ability of these pores to dissipate energy. As such, filling these pores can be detrimental to the acoustic behaviour of fibrous materials.

The study of the behaviour of these textured materials when their surface is covered, either by paint when painted or when they are covered by other decorations, is important not only for users, who may not be aware of the negative impact of such practices, but also for the companies producing these materials, which benefit from the study of these interactions, and may increase their range of products, adapting them more easily to Architectural requirements.

In this sense, this work aims to analyse the effect of applying paint on sound absorbent materials. For this, several tests were performed on samples of agglomerate cork composite and mineral fibres (BASWaphon), before and after painting their surface. In the tests, the influence of the paint was quantified by varying the values of the sound absorption coefficient (α_s), measured in a reverberating chamber following the methodology established in ISO 354.

In the worst case, a decrease of α_s values of 0.26 in the frequency band of 3.150 kHz in the case of cork agglomerate samples and of 0.60 in the frequency band of 2 kHz for the BASWaphon Fine 30 mm sample was noted.

It was concluded that the application of the paint not only led to a decrease in the values of α_s at high frequencies, but also led to the movement of the area of greater sound absorption efficiency to lower frequency bands. However, in the case of "bad" sound absorbent samples, the opposite effect can occur when these are painted. The paint may also have beneficial effects when applied to sound absorbents whose area of greater effectiveness is in bands greater than 5000 Hz.

KEY WORDS: Acoustic, Porous, Paint, Cork, Sound absorption coefficient.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE QUADROS	xv
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	1
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	3
2.2.2.1. VARIAÇÃO DE PRESSÃO	3
2.2.2.2. POTÊNCIA SONORA	4
2.2.2.3. NÍVEIS DE PRESSÃO	4
2.2.2.4. PRESSÃO EFICAZ	5
2.2.2.5. DIRECCIONALIDADE	5
2.2.3. FREQUÊNCIA	6
2.2.3.1. DEFINIÇÃO	6
2.2.3.2. BANDAS DE FREQUÊNCIA	6
2.2.3.3. CURVAS DE PONDERAÇÃO	7
2.2.4. ANÁLISE NO TEMPO	7
2.2.5. ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS	8
2.2.5.1. INTRODUÇÃO	8
2.2.5.2. ABSORÇÃO SONORA	8
2.2.5.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	9

2.2.5.3.1. DEFINIÇÃO	9
2.2.5.3.2. FÓRMULA DE PREVISÃO	10
2.2.5.4. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS	10
3. ESTADO DA ARTE.....	13
3.1. INTRODUÇÃO	13
3.2. ABSORÇÃO SONORA.....	13
3.3. AGLOMERADO COMPOSTO DE CORTIÇA	13
3.4. EFEITO DA TINTA	16
4. METOLOGIA DOS ENSAIOS	25
4.1. METODOLOGIA DOS ENSAIOS.....	25
4.1.1. MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO	25
4.1.2. CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA	27
4.2. CARATERIZAÇÃO DA AMOSTRA	28
4.2.1. AGLOMERADO COMPOSTO DE CORTIÇA.....	28
4.2.2. <i>BASWAPHON FINE 30 MM</i>	32
5. RESULTADOS	37
5.1. AGLOMERADO COMPOSTO DE CORTIÇA	37
5.1.1. RESULTADOS NAS QUATRO AMOSTRAS	37
5.1.2. VARIAÇÃO DOS VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DEVIDO AO EFEITO DA PINTURA	40
5.1.3. <i>NOISE REDUCTION COEFFICIENT</i> E α_w	43
5.2. <i>BASWAPHON</i>	44
6. CONCLUSÃO	49
6.1. CONCLUSÕES GLOBAIS	49

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 52

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 53

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Exemplo de espectros sonoros de um ruído em bandas de 1/1 e 1/3 oitavas.[1].....	6
Fig. 2.2 - Descrição das curvas de ponderação A, B, C e D. [1]	7
Fig. 2.3 – Exemplo de um ensaio em câmara reverberante. [1]	9
Fig. 2.4 - Frequências de atuação dos vários tipos de absorventes sonoros.[2].....	11
Fig.3.1 – Exemplo de <i>aglomerado branco</i> , granulado de aglomerado composto de cortiça [11]	15
Fig. 3.2 - Exemplo de <i>aglomerado puro</i> , granulado de aglomerado negro de cortiça.[11].....	15
Fig.3.3 – Esquema do processo produtivo de aglomerado composto de cortiça, começando pela granulação (1), posterior aglomeração e moldagem (2) e a etapa final da laminação e lixagem (3). [12]	16
Fig. 3.4 – Aparência da superfície das amostras 1 e 2 com $1^{2/3}$ de magnificação [13]	17
Fig. 3.5 – Aparência geral da amostra 3 [13]	18
Fig. 3.6 – Aparência da superfície da amostra 3 depois de ser pintada com cinco camadas de tinta, $1^{2/3}$ de magnificação [13]	18
Fig. 3.7– Aparência da superfície da amostra depois de ser pintada, $1^{2/3}$ de magnificação [13]	18
Fig. 3.8 – Superfície da amostra 6 pintada pelo fabricante, $1^{2/3}$ de magnificação [13].....	18
Fig. 3.9 – Superfície da amostra 9, $1^{2/3}$ de magnificação [13].....	19
Fig. 3.10- Superfície da amostra 6 quando pintada com 4 camadas adicionais de tinta, $1^{2/3}$ de magnificação [13]	22
Fig. 3.11- Superfície da amostra 8a quando pintada com cinco camadas adicionais de tinta, $1^{2/3}$ de magnificação [13]	22
Fig. 3.12- Superfície da amostra 7a quando pintada com 4 camadas adicionais de tinta, $1^{2/3}$ de magnificação [13]	23
Fig. 4.1 – Esquema da posição amostra, na câmara reverberante R1, e das possíveis posições do microfone e da fonte sonora que possibilitam as 12 combinações necessárias para o cumprimento da norma	27
Fig. 4.2– Etiqueta presente nos painéis de cortiça, nas quais estão presentes as características de cada painel. [Foto do autor].....	29
Fig. 4.3 – Etiqueta presente nos painéis de cortiça, nas quais estão presentes as características de cada painel. [Foto do autor].....	29
Fig. 4.4 – Disposição das placas no piso da câmara reverberante para o ensaio. [Foto do autor]	30
Fig. 4.5 – Tinta plástica mate utilizada para pintar as amostras de aglomerado composto de cortiça testadas. [Foto do autor].....	31

Fig. 4.6 - Pormenor do rotulo de identificação da tinta utilizada para pintar as amostras de aglomerado composto de cortiça. [Foto do autor].....	31
Fig. 4.7 –Exemplo de um painel de aglomerado composto de cortiça após ser pintado. [Foto do autor]	32
Fig. 4.8 –Pormenor de um canto de um painel da amostra de <i>BASWaphon Fine 30 mm</i> , onde é visível a massa de barramento (material branco) aplicada na superfície das camadas de <i>BASWaphon Fine</i> (material amarelo). [Foto do autor].....	33
Fig. 4.9 –Esquema da aplicação de <i>BASWaphon Fine</i> em sistemas maciços. [15].....	33
Fig. 4.10 – Esquema da aplicação de <i>BASWaphon Fine</i> em sistemas de tetos suspensos. [15]	34
Fig. 4.11 – Pintura de um painel da amostra de <i>BASWaphon Fine 30 mm</i> . [Fotos cedidas pelo fabricante].....	35
Fig. 4.12 –Pormenor da pintura da amostra onde é possível ver a diferença mínima entre a cor da massa de barramento e a cor da tinta. [Fotos cedidas pelo fabricante]	36
Fig. 5.1 – Valores do coeficiente de absorção sonora das amostras <i>C6</i> e <i>C6-leve</i> (aglomerado composto de cortiça)	39
Fig. 5.2 – Valores do coeficiente de absorção sonora das amostras <i>C2</i> e <i>C2-leve</i> (aglomerado composto de cortiça)	39
Fig. 5.3 – Valores do coeficiente de absorção sonora (α_s) da amostra <i>C6</i> (aglomerado composto de cortiça) <i>antes</i> e <i>depois</i> da pintura.	41
Fig. 5.4 – Valores do coeficientes de absorção sonora (α_s) da amostra <i>C2</i> (aglomerado composto de cortiça) <i>antes</i> e <i>depois</i> da pintura.	42
Fig. 5.5 – Valores do coeficiente de absorção sonora (α_s) da amostra <i>C6-leve</i> (aglomerado composto de cortiça) <i>antes</i> e <i>depois</i> da pintura.	42
Fig. 5.6 – Valores do coeficiente de absorção sonora (α_s) da amostra <i>C2-leve</i> (aglomerado composto de cortiça) <i>antes</i> e <i>depois</i> da pintura.	43
Fig. 5.7 – Evolução dos valores do coeficiente de absorção sonora na amostra de <i>BASWaphon Fine 30 mm</i> <i>antes</i> e <i>após</i> a sua pintura.....	46
Fig. 5.8 –Valores de $\Delta\alpha_s$ nas bandas de frequência de 1/3 de oitava dos 100 aos 5000 Hz.	46
Fig. 5.9 – Diferença em percentagem entre a capacidade de absorção sonora <i>depois</i> e <i>antes</i> da amostra <i>BASWaphon Fine 30 mm</i> ser pintada.	47

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Valores do coeficientes de absorção sonora obtidos [13]	20
Quadro 4.1 – Valores de área de absorção sonora equivalente máximos corrigidos para um volume igual a m^3	26
Quadro 4.2 –Características dos painéis usados nos ensaios.	29
Quadro 4.3 –Valores de coeficientes de absorção sonora (α_s) previstos para uma amostra de <i>BASWAphon FINE 30 mm</i> montada num sistema maciço.	34
Quadro 5.1 – Coeficientes de absorção sonora (α_s) das quatro amostras de aglomerado composto de cortiça <i>antes</i> e <i>depois</i> de pintadas.	38
Quadro 5.2 –Diferenças entre os valores do coeficiente de absorção sonora ($\Delta\alpha_s$) das amostras C6, C2, C6- <i>leve</i> , C2- <i>leve</i> , de aglomerado composto de cortiça, <i>depois</i> e <i>antes</i> da pintura	40
Quadro 5.3 – Valores de <i>NRC</i> obtidos para as amostras C6, C2, C6- <i>Leve</i> , C2- <i>leve antes</i> e <i>depois</i> da pintura.....	43
Quadro 5.4 – Valores de α_w obtidos para as amostras C6, C2, C6- <i>leve</i> , C2- <i>leve antes</i> e <i>depois</i> da pintura. nc- <i>não classificado</i>	44
Quadro 5.5 – Valores dos coeficientes de absorção sonora dos testes em câmara reverberante da amostra de <i>BASWAphon Fine 30 mm</i>	45
Quadro 5.6 – Valores de <i>NRC</i> e α_w obtidos para a amostra de <i>BASWAphon Fine 30 mm antes</i> e <i>depois</i> da pintura.	48
Quadro 6.1 – Variação dos valores do coeficiente de absorção sonora ($\Delta\alpha_s$) das amostras C6, C2, C6- <i>leve</i> , C2- <i>leve</i> , de aglomerado composto de cortiça, <i>depois</i> e <i>antes</i> da pintura, em, valores absolutos e sobre a forma de percentagem ($\Delta\alpha_{sp} (\alpha_{depois} - \alpha_{antes}) / \alpha_{antes} (%)$).	50
Quadro 6.2 –Variação dos valores de valores de <i>NRC</i> e α_w obtidos para as amostras de C2, C2- <i>leve</i> , C6 e C6- <i>leve</i>	51
Quadro 6.3 – Resumo dos valores de $\Delta\alpha$ calculados através dos resultados dos testes realizados na amostra de <i>BAWSAphon (Fine 30 mm)</i>	51
Quadro 6.4 – Variação dos valores de <i>NRC</i> e o α_w calculados através dos resultados dos testes realizados na amostra de <i>BAWSAphon (Fine 30 mm)</i>	52

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

α - Coeficiente de absorção sonora

c – Celeridade (m/s)

t -Temperatura (K)

I – Intensidade sonora (W/m^2)

W – Potência sonora (W)

r – Distância entre o emissor e recetor (m)

p – Pressão sonora (Pa)

ρ – massa volúmica (kg/m^3)

p_0 - Pressão sonora de referência (Pa)

L_i - Nível de intensidade sonora (dB)

I_0 - Intensidade sonora de referência (W/m^2)

L_W - Nível de potência sonora (dB)

W_0 - Potência sonora de referência (W)

RMS – Valor de pressão sonora eficaz (Pa)

V - Volume (m^3)

A - Absorção sonora equivalente (m^2)

S – área de Superfície (m^2)

NCR – *Noise reduction coeficiente*

$L_p(t)$ - Nível de pressão sonora médio, no instante t (dB)

$L_{pn}(t)$ - Nível de pressão sonora do decaimento de ordem n , no instante t (dB)

m - Coeficiente de atenuação devido à presença do ar

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

A Acústica de Edifícios foi evoluindo ao longo do tempo, sendo que o seu primórdio pode ser associado á construção de anfiteatros e igrejas.

No início os cuidados com a acústica e as medidas para o seu melhoramento, baseavam-se maioritariamente na geometria das salas desenvolvendo-se, posteriormente, um equilíbrio entre a geometria e os materiais e sistemas usados, de forma a criar um bom comportamento acústico nas salas.

Os Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros podem ser agrupados em três grupos: Porosos e fibrosos, Ressonadores e Membranas.

Os Porosos e fibrosos, também chamados de texturados, serão o alvo deste trabalho em particular, duas subcategoria, os “aglomerados de cortiça”, bem como as fibras minerais. Entre os dois tipos de “aglomerado de cortiça, só um apresenta características de absorção acústica desejáveis, o aglomerado negro de cortiça”, apesar disso o material usado neste estudo foi o outro tipo de “aglomerado de cortiça” o aglomerado composto de cortiça.

Devido ao mecanismo de absorção inerente aos materiais alvo deste estudo, que se baseia na existência de poros superficiais, a pintura, ou tapagem destes poros, pode vir a “estragar” a sua capacidade de absorção sonora.

O objetivo desta dissertação é então estudar o efeito da pintura de painéis de material absorvente sonoro. Para isso serão realizados ensaios em câmara reverberante, de forma a medir o coeficiente de absorção sonora (α) com e sem pintura. Esta comparação tem como propósito estabelecer uma ligação entre a tinta aplicada e a variação do α que possa ser útil para posterior utilização como referência aos projetistas

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação será dividida em seis capítulos:

O primeiro e presente capítulo, “Introdução”, tem como objetivo expor a razão para qual esta tese foi realizada e os objetivos que se pretendem obter.

O segundo capítulo, “Conceitos e Definições”, define os conceitos base enunciados durante o desenvolvimento da tese, necessários á sua compreensão.

O terceiro capítulo, “Estado da Arte”, faz um resumo da evolução histórica do tema, bem como apresenta estudos efetuados sobre o impacto de pinturas em absorventes acústicos.

O quarto capítulo, “Metodologia dos ensaios”, estabelece a metodologia utilizada nos ensaios e aspetos importantes destes.

O quinto capítulo, “Resultados”, expõe os resultados obtidos nos ensaios e a comparação entre estes.

O sexto capítulo, “Conclusão”, apresenta as conclusões obtidas da análise dos resultados e além disso possíveis desenvolvimentos futuros.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. INTRODUÇÃO

A Acústica é o ramo da Física onde se analisa e estuda as ondas sonoras [1]. Uma das suas várias áreas, como a electroacústica, pissoacústica, etc. É a Acústica de Edifícios, “criada” por W.C. Sabine, que apresenta duas maneiras distintas de análise, a correção acústica e o isolamento sonoro.

Na ótica desta dissertação, só se irá trabalhar a primeira, que se refere a casos onde ter uma boa qualidade sonora é o interesse principal.

O presente capítulo pretende explicar vários conceitos base da acústica de forma que qualquer leitor, mesmo que com menor conhecimento da área, possa compreender o objetivo, mas também o resultado obtido na execução desta dissertação.

2.2. PRINCÍPIOS BÁSICOS

2.2.1. SOM E RUÍDO

O som e o ruído são simplesmente uma sensação provocada no cérebro devido à captação, pelo sistema auditivo, de uma variação de pressão que se propaga pelo ar. A diferença entre os dois baseia-se no facto que o som provoca uma sensação agradável ao ouvinte e o ruído provoca, o oposto, uma sensação desagradável. [1]

Limitando o seguinte estudo à propagação do som no ar, pode-se verificar que este propaga-se sob a forma de ondas concêntricas com a fonte sonora como centro, criando zonas de compressão e rarefação devido ao choque entre partículas do meio de propagação.

Na prática, o estudo do som é feito em três domínios de análise distintos: a pressão, frequência e o tempo. [1]

2.2.2. PRESSÃO SONORA

2.2.2.1. VARIAÇÃO DE PRESSÃO

A variação da pressão provocada pelas ondas sonoras é das características do som mais importantes a medir, mas utilizando sempre como referência a pressão atmosférica normal ($P_{at} \approx 10^5$ Pa), para descrever o som. [1]

Num meio homogêneo, isotrópico, sem viscosidade e em repouso, a *lei geral de propagação das ondas de pressão sonora* pode ser deduzida e escrita através da junção de três princípios fundamentais da mecânica (2.1), na qual a celeridade (c) no ar varia com a temperatura (T), segundo a expressão 2.2 (válida para o ar seco e ao nível do mar).[1]

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

$$c = 20,045\sqrt{T} \quad (2.2)$$

Em que,

$$T(K) = 273,15 + \theta(^{\circ}C) \quad (2.3)$$

2.2.2.2. POTÊNCIA SONORA

Para além da pressão existem outras grandezas importantes para a análise da propagação sonora tais como a intensidade sonora e a potência sonora. [1]

Na análise de propagação, a intensidade (I) permite avaliar a componente direcional ao quantificar a quantidade de energia média que atravessa por segundo uma área de 1 m^2 , normal à direção e expressa-se em W/m^2 , de tal forma representa-se através de uma grandeza vetorial. A potência sonora (W) depende somente da fonte, sendo caracterizada como a energia total que num segundo atravessa uma esfera fictícia de raio qualquer centrada na fonte e quantificada em W . [1]

A pressão, intensidade e potência sonora relacionam-se através da seguinte expressão (2.4):

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (2.4)$$

Onde,

I – intensidade sonora (W/m^2);

W – potência sonora (W);

r – distância entre o emissor e recetor (m);

p – pressão sonora (Pa);

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

c – celeridade (m/s) $\approx 340 \text{ m/s}$.

2.2.2.3. NÍVEIS DE PRESSÃO

A avaliação da variação de pressão é feita através de uma escala logarítmica usando o decibel (dB), devido à disparidade de valores obtidos através do uso de uma escala linear, como o pascal (Pa), para a medição dos estímulos sonoros.

O uso de uma escala logarítmica tem também outro benefício, pois esta assemelha-se à forma que o ouvido humano responde aos estímulos sonoros.

Para converter a pressão sonora em níveis de pressão sonora usa-se a seguinte expressão:

$$Lp = 20 \log \frac{p}{p_0} = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} \quad (2.5)$$

Onde, $p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$

A intensidade e a potência sonora também são, habitualmente, medidas em dB, denominando-se então como nível de intensidade sonora (L_I):

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}, \text{ sendo } I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad (2.6)$$

E o nível de potência sonora (L_W):

$$L_W = 10 \cdot \log \frac{W}{W_0}, \text{ onde } W_0 = 10^{-12} \text{ W} \quad (2.7)$$

Devido à sua natureza logarítmica a soma de níveis é feita segundo a seguinte expressão:

$$L_{soma} = 10 \log \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (2.8)$$

Para N níveis de pressão L_i .

Ao contrário de uma soma algébrica a soma de duas fontes com o mesmo nível não é igual ao dobro desse nível, mas sim:

$$\begin{aligned} L_{soma} &= 10 \log \left(10^{\frac{L_i}{10}} + 10^{\frac{L_i}{10}} \right) = 10 \log 2 + 10 \log \left(10^{\frac{L_i}{10}} \right) = \\ &= 3 + L_i \end{aligned} \quad (2.9)$$

2.2.2.4. PRESSÃO EFICAZ

A medição dos valores eficazes ou RMS (*root mean square*) são variáveis importantes para o estudo de várias variáveis com interesse para a Acústica (nomeadamente a pressão), devido a estas terem variações temporais acentuadas. [1]

A pressão eficaz define-se então pela seguinte expressão:

$$p_{ef}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt \quad (2.10)$$

No caso dos sons puros, a pressão máxima relaciona-se com a pressão eficaz de seguinte forma:

$$p_{ef} = \frac{P_{máxima}}{\sqrt{2}} \approx 0.71 P_{máxima} \quad (2.11)$$

2.2.2.5. DIRECCIONALIDADE

Na generalidade as fontes sonoras não são omnidireccionais, isto é, não emitem a mesma energia em todas as direcções. Para estudar a direcionalidade do som são utilizados dois parâmetros, o coeficiente de direcionalidade (Q) e o índice de direcionalidade (G). [1]

O primeiro refere-se à relação entre a intensidade sonora propagada numa dada direcção (φ, ϕ) e a que na mesma direcção propagaria uma fonte omnidireccional com a mesma potência. O índice de direcionalidade é calculado em função do coeficiente de direcionalidade através da seguinte expressão [1]:

$$G(\varphi, \phi) = 10 \log Q(\varphi, \phi) \quad (2.12)$$

$$G(\varphi, \phi) = L_p(\varphi, \phi) - L_{p_{OMNI}} \quad (2.13)$$

2.2.3. FREQUÊNCIA

2.2.3.1. DEFINIÇÃO

A frequência é definida como o número de ciclos que são completos por segundo e mede-se em hertz (Hz).

Quase todos os sons (ou ruídos) contêm diferentes frequências e uma fonte sonora é muitas vezes diferenciável de outra também pelas frequências que emite.[1]

É através da frequência que se distinguem os sons “puros” e os “complexos” sendo que, os sons “puros” são constituídos por uma única frequência enquanto que os complexos são compostos por vários sons “puros”.

Na Acústica de Edifícios distinguem-se três zonas de frequências:

Frequências graves: 20 a 355 Hz;

Frequências médias: 355 a 1410 Hz;

Frequências agudas: 1410 a 20000 Hz.

2.2.3.2. BANDAS DE FREQUÊNCIA

Existindo centenas de frequências um estudo detalhado de cada seria muito trabalhoso, daí separarem-se em agrupamentos de frequências denominados de “bandas”, correspondentes a intervalos de frequência de certa dimensão normalizada. [1]

Uma “banda” tem, sempre um limite inferior (f_1), um limite superior (f_2) e o valor médio (f_0) que é chamado de frequência central.

A diferença entre o limite superior e o inferior é chamada de largura de banda (B), podendo ser calculado pela expressão 2.14. Existem várias bandas, mas as mais utilizadas na acústica de edifícios são a banda de 1/1 de oitava e a de 1/3 de oitava (Figura 2.1.).

$$B = f_2 - f_1 = \frac{2^K - 1}{\sqrt{2^K}} f_0 \quad (2.14)$$

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

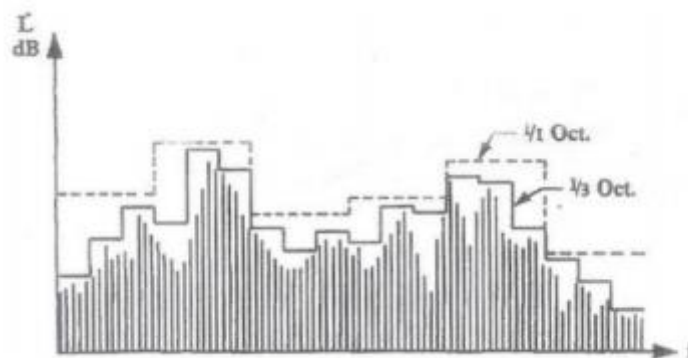


Fig. 2.1. – Exemplo de espectros sonoros de um ruído em bandas de 1/1 e 1/3 oitavas.[1]

2.2.3.3. CURVAS DE PONDERAÇÃO

Ao contrário dos microfones que capturam as pressões sonoras sem qualquer preferência, em termos de frequência, o ouvido humano é mais sensível para frequências na zona dos 2300 aos 2800 Hz e é pouco sensível para as baixas frequências. [1]

Devido a esta preferência surgem curvas de igual percepção de intensidade sonora que são escalonadas com a unidade denominada de *fone* (F). Importante de referir que para comparar diretamente um som com outro em termos de intensidade é utilizada outra unidade, o *sones* (S), por exemplo um som que seria perceptível com o dobro da intensidade de outro com 1 *sones* teria 2 *sones* [1]. A relação entre ambas as variáveis é:

$$S = 2^{(F-40)/10} \quad (2.15)$$

Para “corrigir” a sensibilidade dos equipamentos de modo a quês estes se aproximem ao ouvido humano, usa-se filtros eletrônicos. As curvas criadas pelas correções efetuadas em função da frequência são chamadas de curvas de ponderação. Existem vários filtros (figura 2.2.), mas atualmente o mais usado é o filtro A. Para assinalar a correção de um nível sonoro pelo filtro A é adicionado um A há sua denominação (exemplo: $L = \dots$ dB(A) ou $L_A = \dots$ dB).

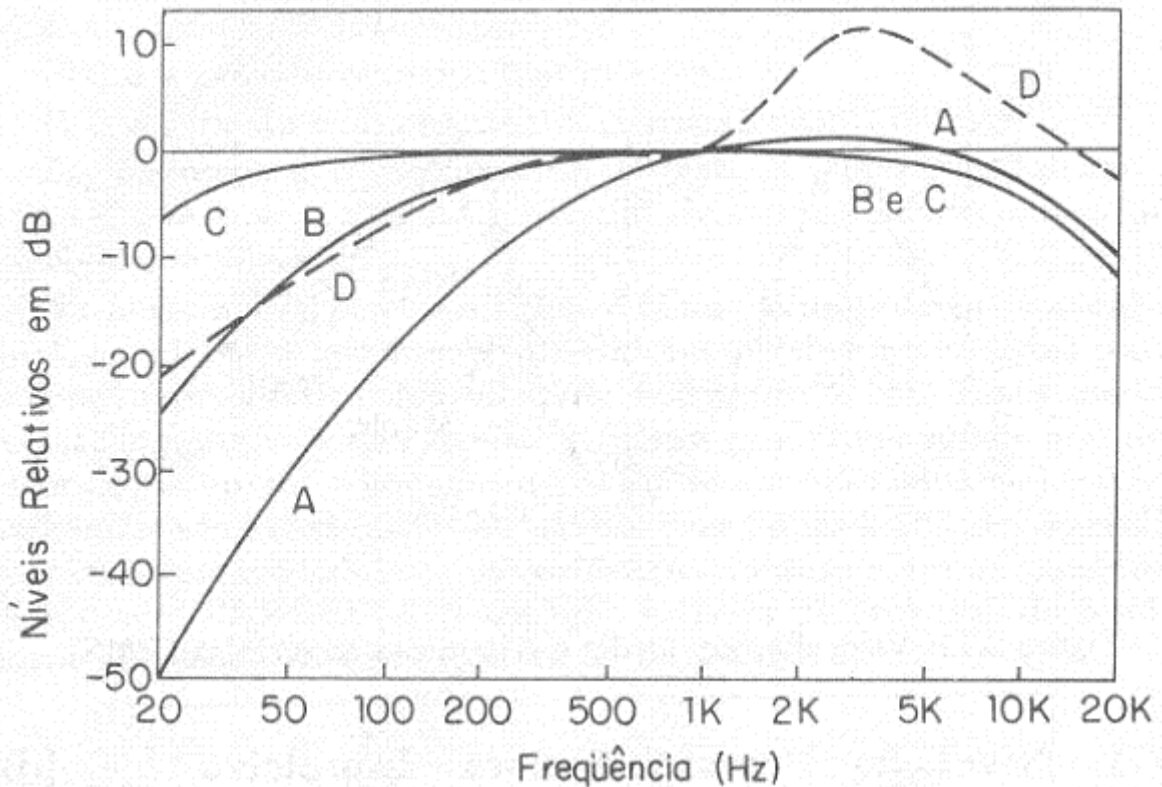


Fig. 2.2. – Descrição das curvas de ponderação A, B, C e D. [1]

2.2.4. ANÁLISE NO TEMPO

A duração do ruído é um fator importante para a sua análise, havendo ruídos de curta duração, quase instantânea e ruídos de duração quase infinita.[1]

Para melhor descrever o som utiliza-se descritores *estatísticos* e/ou *energéticos*.

O nível de pressão sonora contínuo equivalente ou L_{eq} é um parâmetro *energético* que define-se como o nível que se atuasse de forma constante ao longo de um certo tempo, apresentaria a mesma energia que o som que se pretende avaliar. Podendo-se calcular através de seguinte expressão:

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \quad (2.16)$$

Os parâmetros estatísticos (L_N) estão associados a quantis de densidade de probabilidade. O L_N é definido como o nível que, num dado intervalo de tempo, é excedido em N% da duração temporal desse intervalo.

2.2.5. ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS

2.2.5.1. INTRODUÇÃO

A Acústica de Edifícios apresenta duas vertentes distintas de análise. Uma focada na correção de comportamento de um comportamento ao som aí emitido (correção acústica) e outra que refere a tratar um compartimento para sons externos (isolamento sonoro).

2.2.5.2. ABSORÇÃO SONORA

A absorção sonora é a capacidade de dissipação da energia sonora que incide sobre um material. [1]

Esta capacidade é quantificada através do coeficiente de absorção sonora (α), calculado através de equação 2.17.

$$\alpha = \frac{E_{asborvida}}{E_{incidente}} \quad (2.17)$$

Sendo,

$E_{asborvida}$ - Energia absorvida pelo material

$E_{incidente}$ – Energia incidente no material

O coeficiente de absorção sonora varia entre 0 e 1 podendo os materiais com α maior que 0,5 ser chamados de “absorventes”.

Também é usual usar-se o parâmetro *NRC* (*noise reduction coefficient*) obtido através da média aritmética dos valores de α das bandas de oitavas dos 250 aos 2000 Hz.

Existe outro parâmetro “médio” denominado de α_w que se obtém por ajuste ponderado numa curva de referência usando as bandas de oitavas dos 250 aos 4000 Hz. Traça-se uma curva dos valores de α por banda e determina-se a soma dos desvios positivos entre uma curva de referência móvel. O α_w é o valor lido para a frequência central de 500 Hz na curva ajustada, de modo a que, a soma dos desvios positivos seja a mais elevada possível sem ultrapassar os 0,10 (em múltiplos de 0,05) acrescentando-se uma letra (L, M ou H) sempre que o coeficiente de absorção medido exceda o do valor de referência em 0,25 ou mais, caso aconteça nos 250-500, 1000-2000 ou 4000 respetivamente. [1]

O coeficiente de absorção sonora pode ser determinado através de dois métodos normalizados: o método do tubo de ondas estacionárias (tubo de Kundt) e o método da câmara reverberante.

O método do tubo de Kundt consiste num tubo metálico onde numa extremidade é colocada a amostra a testar e na outra extremidade existe um pequeno altifalante com um orifício, para fazer

passar uma pequena vareta metálica ligada a um microfone que desliza sobre rodas num recipiente. O altifalante quando ligado cria ondas estacionárias devido há interação entre a onda incidente e a refletida na amostra. Através da forma desta onda estacionária é possível determinar a absorção sonora do material. [1]

O método da câmara reverberante obtém valores mais fidedignos, pois ao contrário do α obtido através do método do tubo de ondas estacionárias, que se refere unicamente a incidências, das ondas sonoras, perpendiculares, ao material o α calculado segundo o método da câmara reverberante contempla de uma incidência quase total das ondas sonoras no material (campo difuso).

Os ensaios em câmara reverberante para medição em laboratório do α são regidos pela norma NP EN ISO 354. Estes ensaios, como já foi referido anteriormente, originam resultados mais aproximados à realidade, mas, porém, têm a desvantagem de precisar de uma maior amostra de material para teste, entre 10 e 12 m². A câmara reverberante, em si, é uma grande sala em que todas as superfícies são refletoras (α quase nulo), de forma a obter-se um tempo de reverberação elevado (Figura 2.3.). Durante o ensaio, a amostra de material é colocada no piso e é medido o tempo de reverberação, que é depois comparado com o tempo de reverberação da sala vazia. Obtendo-se assim o valor de α do material. Para este método ser eficaz é preciso assegurar que o campo sonoro dentro da câmara é suficientemente difuso, pelo que se coloca difusores suspensos no teto (fig. 2.3.). [1]

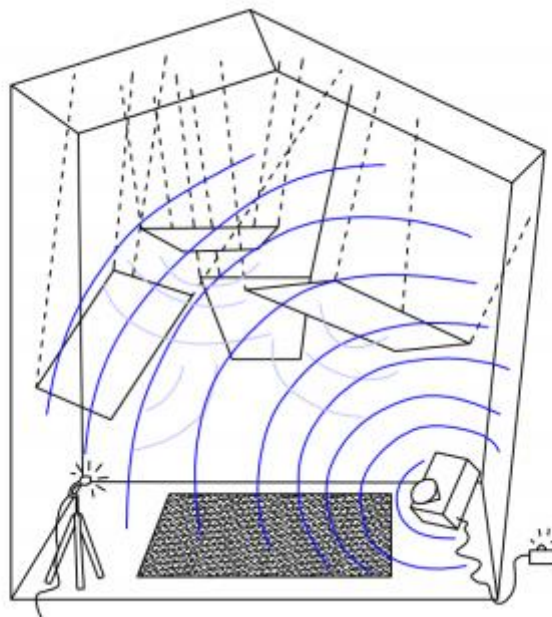


Fig. 2.3. – Exemplo de um ensaio em câmara reverberante. [1]

2.2.5.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

2.2.5.3.1. DEFINIÇÃO

O tempo de reverberação é chamado o intervalo de tempo que qualquer som demora a extinguir-se por completo. Por definição é o tempo em que o nível de pressão sonora demora a decair 60 dB desde que a fonte sonora para de emitir. Contudo raramente se obtém, em condições práticas,

o decaimento total dos 60 dB antes do “ruído de fundo” se sobrepor. Nesses casos é habitual tentar obter um decaimento de 30 dB e extrapolar o decaimento (T30). [1]

A medição do tempo de reverberação necessita de uma fonte sonora suficientemente forte para emitir em todo o espectro frequência, bem acima do “ruído de fundo”. Para esse efeito usa-se habitualmente altifalantes a emitir impulsos de banda estreita ou disparos de pistolas de pólvora seca.

O efeito do tempo de reverberação é duplo e antagónico [1]:

- Aumenta o nível sonoro;
- Mascara os sons diretos.

Um dos mais importantes impactos do tempo de reverberação é o efeito que este tem na palavra, sendo preferível um tempo de reverberação baixo de modo a impedir que o curto período de emissão das consoantes seja suplantado pelo “rasto sonoro” das vogais antecedentes. De modo contrário, em salas dedicadas a música é pretendido um tempo de reverberação alto o suficiente de forma a que música “soe” melhor. [1]

2.2.5.3.2. FÓRMULA DE PREVISÃO

O tempo de reverberação pode também ser calculado usando a fórmula de Sabine. O físico americano *W.C. Sabine* determinou em 1898 a relação entre a absorção sonora, o volume do compartimento e o tempo de reverberação na seguinte fórmula:

$$T = \frac{0,16 \cdot V}{A} \quad (2.19)$$

Sendo que:

T - Tempo de reverberação (s);

V - Volume do compartimento (m³);

A - Absorção sonora equivalente (m²),

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i \quad (2.20)$$

α – coeficiente de absorção sonora do material;

S – Superfície real do material (m²).

Os valores obtidos pela aplicação da fórmula são mais próximos da realidade para locais com campos sonoros difusos e coeficientes de absorção sonora média inferior a 0,20. [1]

2.2.5.4. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS

Os materiais e sistemas absorventes sonoros, podem ser agrupados em três categorias, devido as suas características básicas e cada um dos tipos de matérias atuam em gamas distintas de frequências (Figura 2.4.). As categorias são:

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

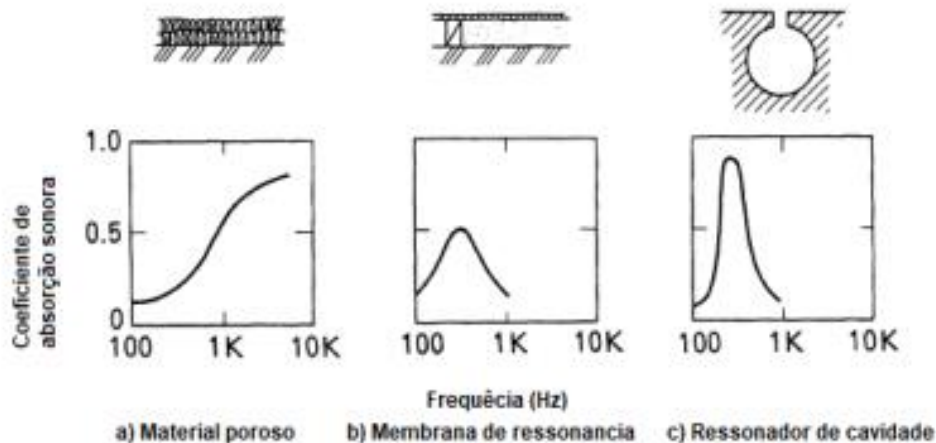


Fig. 2.4. - Frequências de atuação dos vários tipos de absorventes sonoros.[2]

Para o desenvolvimento desta dissertação, os materiais porosos e fibrosos são os mais importantes.

Estes materiais, que também podem de ser chamados de *texturados* são mais eficazes nas altas frequências. A sua capacidade de absorção sonora advém da existência de poros e interstícios. Os materiais fibrosos ao serem atingidos por ondas sonoras, transmitem a energia destas pelas suas fibras, onde parte da energia é transformada em calor devido á fricção entre moléculas. Por um lado, se as fibras estiverem muito soltas não se gerará fricção suficiente, por outro lado, se o material for muito denso as ondas não iram penetrar o suficiente neste. Então a eficácia depende diretamente da densidade e espessura do absorvente sonoro. A eficiência dos matérias porosos depende da capacidade de estes dissiparem a energia sonora nos seus minúsculos poros. A pintura dos materiais porosos pode vir a prejudicar a sua eficácia devido à oclusão dos poros.[1]

Os materiais porosos e fibrosos podem ser consequentemente subdivididos em função das suas características físicas em:

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

Dentro do grupo dos aglomerados de cortiça existem dois tipos: o aglomerado negro de cortiça e o aglomerado composto de cortiça. Só o aglomerado negro de cortiça apresenta valores de coeficientes de absorção sonora suficientemente altos para ser considerado um “bom absorvente”.

3

ESTADO DA ARTE

3.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo é desenvolvida brevemente alguma da evolução histórica do conceito de absorção sonora, bem como a origem de um dos materiais em estudo, o aglomerado composto de cortiça, seguidamente é analisado um estudo prévio sobre o tema da pintura em materiais ou sistemas de absorção sonora.

3.2. ABSORÇÃO SONORA

Com o objetivo de proporcionar um melhor entendimento sobre o conceito de absorção sonora, de seguinte apresenta-se uma versão sintetizada da evolução histórica do conceito.

Começando em primeiro lugar por W. C. Sabine, nos finais do século XIX, e os seus trabalhos que resultaram na determinação da relação entre a Absorção sonora, o Volume de uma divisão e o Tempo de Reverberação desta. [1]

Em seguida, em 1950 é descrito um processo de determinação do coeficiente de absorção sonora para incidência difusa através do coeficiente de absorção sonora para incidência normal, por London. [3,4]

Seguido por vários avanços no conhecimento, efetuados por pessoas como Kinsler em [5], Sacerdote *et al.* em [6] e Beranek em [7]. [3]

Surgiram em 1978, as primeiras obras nacionais sobre o tema. Elaboradas por P.M. Silva, que mais tarde viria a melhorar as suas passadas publicações, adicionando várias análises experimentais [3], tornando as suas obras, *Acústica de Edifícios* [8] e *Condicionamento Acústico de Edifícios – Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros* [9], uma leitura quase obrigatória.

Em 2005, é criada uma compilação dos coeficientes de absorção sonora dos materiais mais utilizados na construção corrente, pela mão de Odete Domingues na obra intitulada *A Acústica nos Edifícios: Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros*. [3]

3.3. AGLOMERADO COMPOSTO DE CORTIÇA

O aglomerado composto de cortiça como o seu nome indica provem da cortiça. Material este original do sobreiro, onde constitui o revestimento exterior do tronco e ramos do sobreiro.

A cortiça de um sobreiro só é retirada pela primeira vez quando a árvore atinge 20 a 35 anos e é chamada de *cortiça virgem*, esta não tendo a qualidade para o seu uso na criação de rolhas é triturada e utilizada na produção de aglomerados. Só à terceira vez que a cortiça é retirada, passado aproximadamente 18 anos após o primeiro descortiçamento, é que esta tem a qualidade necessária para a criação de rolhas. Sendo que a segunda vez que ocorre o descortiçamento a cortiça aí produzida é granulada e utilizada em pavimentos. [10]

As propriedades intrínsecas da cortiça como a impermeabilidade a líquidos e a gases, a sua elasticidade, excelente comportamento como isolante térmico e acústico entre outras, devem-se a uma combinação entre a sua composição química e a estrutura da suas células. O principal componente da composição química da cortiça é a suberina, uma mistura de ácidos orgânicos a partir da qual são formadas as paredes das células, sendo esta a responsável pela impermeabilidade das células de cortiça e subsequentemente a impermeabilidade da cortiça em si. Por outro lado, a célula de cortiça tem uma forma de prisma, quer pentagonal ou hexagonal, cujo interior está cheio de elementos gasosos, de constituição semelhante ao ar. A junção destas duas características proporcionam à cortiça a sua elasticidade, mas mais importante a sua má condutibilidade térmica. [11]

A cortiça como matéria-prima pode ser transformada em vários produtos, podendo estes, via o processo de transformação, ser divididos em duas categorias: os *produtos de cortiça natural* e os *produtos de cortiça aglomerada*. [10]

Os produtos de cortiça natural diferenciam-se dos produtos aglomerados, pois na sua produção não sofrem grandes alterações, sendo que a maior modificação que sofrem da matéria-prima é o seu corte em formas mais úteis ao uso. Exemplos deste tipo de produtos são as rolhas naturais. [10]

Por sua vez os aglomerados de cortiça podem ser subdivididos em dois subgrupos os *aglomerados compostos* (Fig. 3.1) e *aglomerados puros* (Fig. 3.2).

As diferenças principais entre estes devem-se ao material utilizado na sua produção. Os aglomerados puros são fabricados através de um processo de aglutinação e granulados de *cortiça virgem* sem a utilização de aditivos. Por sua vez, o aglomerado composto de cortiça é constituído por granulados de cortiça da primeira e segunda casca extraída do sobreiro bem como os restos da produção de rolhas e desperdícios de cortiça. [11]

A produção de aglomerados de cortiça segue 3 etapas de produção (Fig.3.3). A primeira etapa trata-se da granulação, ou seja, a trituração da matéria-prima utilizada, que como já foi referido anteriormente pode se tratar de refugo, aparas, desperdícios de cortiça e cortiça virgem ou secundeira, e posterior separação e armazenamento por granulometria e densidade. [12]



Fig. 3.1.(esq.) – Exemplo de *aglomerado branco*, granulado de aglomerado composto de cortiça [11]

Fig. 3.2.(dir.) – Exemplo de *aglomerado puro*, granulado de aglomerado negro de cortiça.[11]

A segunda etapa é onde se procede à aglomeração dos grânulos, este processo ocorre em misturadores de pás ou helicoidais com o uso de uma ação conjunta da pressão, temperatura e um agente de aglutinação. A massa volumétrica específica do aglomerado varia em função do uso final pretendido. É possível entre a aglutinação e a moldagem do composto proceder-se à coloração deste ao adicionar-se pigmentos. A moldagem sucede a aglutinação dos grânulos, durante a moldagem os grânulos e as resinas são colocados em moldes e prensados posteriormente sendo colocados em estufa. Existe outro processo de moldagem denominado *tapete*, neste processo os grânulos, aglutinantes e agentes, são, após serem misturados, colocados num tapete rolante onde são prensados, a uma temperatura de 120-180°C, formando um folha única da espessura desejada.[11]

Por fim procede-se á laminação e lixagem de forma a obter-se a espessura e grau de rugosidade pretendidas.

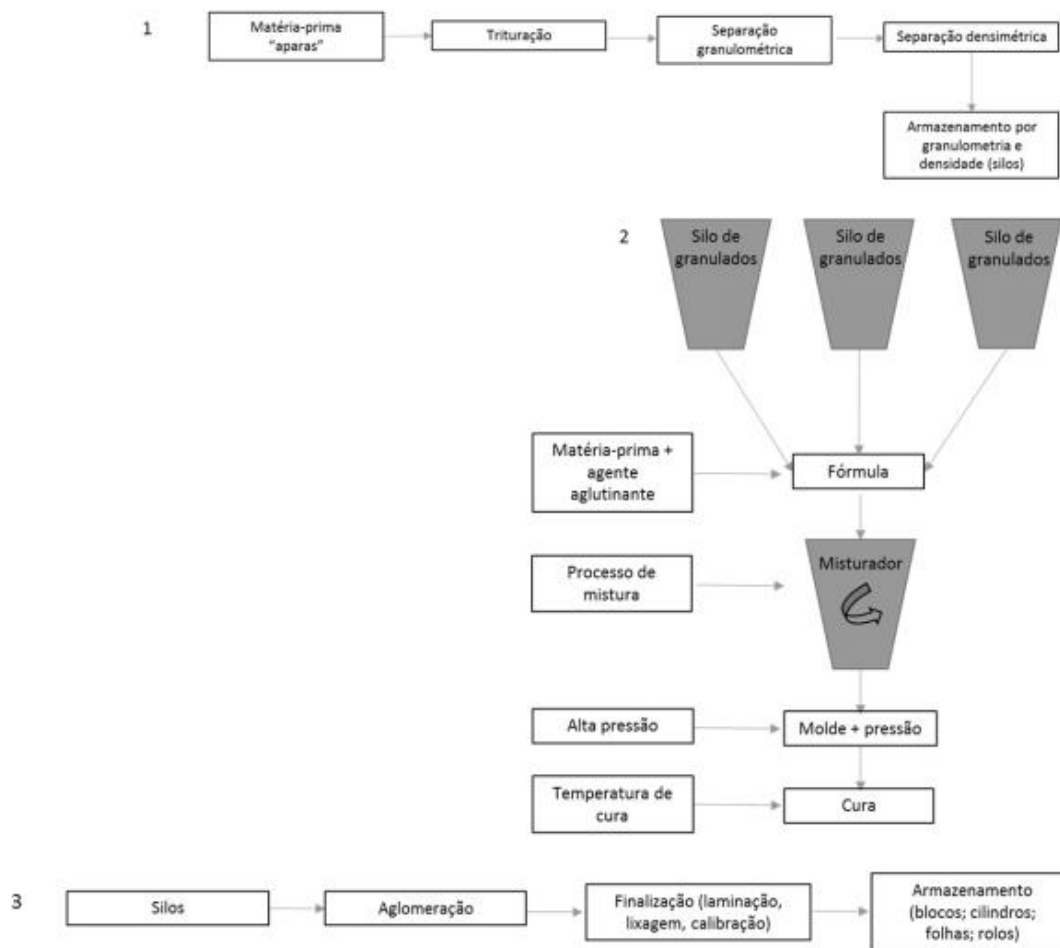


Fig. 3.3.– Esquema do processo produtivo de aglomerado composto de cortiça, começando pela granulação (1), posterior aglomeração e moldagem (2) e a etapa final da laminação e lixagem (3). [12]

3.4. EFEITO DA TINTA

Em 1940 foi publicado, pelo *National Bureau of Standards*, um estudo sobre o efeito da pintura na absorção sonora de materiais acústicos [13] onde foram analisadas nove tipos de amostras, quanto aos valores do coeficiente de absorção sonora antes e depois da pintura.

As amostras 1 e 2 eram representativas de um material fibroso proveniente da madeira, comparadas a *fine Excelsior* (fios longos de material vegetal provenientes da trituração da madeira, visíveis na figura 3.4), a diferença entre as amostras provém do facto que a primeira vinha com a sua cor natural e a segunda vinha pintada pelo fabricante. Como a superfície destas amostras não era branca, teve-se de aplicar uma camada de tinta branca, aplicada com pincel, antes de pintar a linha preta e depois aplicou-se mais quatro camadas de tinta branca (total de cinco camadas de tinta). Observou-se durante a pintura que devido ao material ser constituído por fibras soltas era mais eficaz efetuar a pintura a *spray*, conseguindo-se o mesmo nível de cobertura precisando de menos tinta.

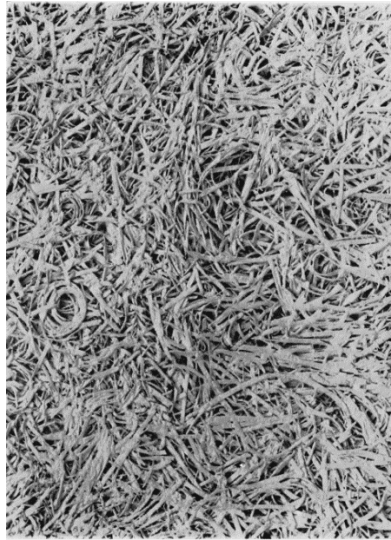


Figura 3.4 – Aparência da superfície das amostras 1 e 2 com $1^{2/3}$ de magnificação [13]

A amostra 3 era representativa de um material incombustível de aparência visível na figura 3.5. À semelhança das amostras 1 e 2 esta também teve de levar uma camada de tinta branca antes de se aplicar a linha preta. De referenciar que depois da pintura os pequenos poros superficiais ficaram tapados, mas os poros maiores, aqueles que têm o aspeto de fissuras, ficam destapados, precisando de muita mais tinta para serem tapados (visível na figura 3.6).

A amostra 4 era de um material perfurado representativo de um sistema de ressoadores agrupados. O material vinha de origem pintado de branco, por isso foram-lhe só aplicadas quatro camadas de tinta com um pincel (figura 3.7).

A amostra 5 é representativa de um material fibroso parecido com as amostras 1 e 2, mas este é mais compacto tendo menos espaço entre as fibras, que comparadas com as amostras anteriores são muito mais finas. Nesta amostra procedeu-se à pintura não só com pincel (amostra 5a), mas também por *spray* (amostra 5b).

A amostra 6 é representativa de um material que, apesar de não ser definido no documento, apresenta uma superfície semelhante ao do aglomerado negro de cortiça (figura 3.8). O material vinha já pintado de branco pelo fabricante.

As amostras 7 e 8 são representativas de materiais para projeção, sendo aplicados por uma pistola de ar. Podem ser aplicados vários tipos de acabamentos ao material usado, sendo que a amostra 7 levou um acabamento, intitulado pelo fabricante de *travertine* e a amostra 8 um tratamento liso.

A amostra 9 é representativa de um material com uma superfície rugosa (figura 3.9).

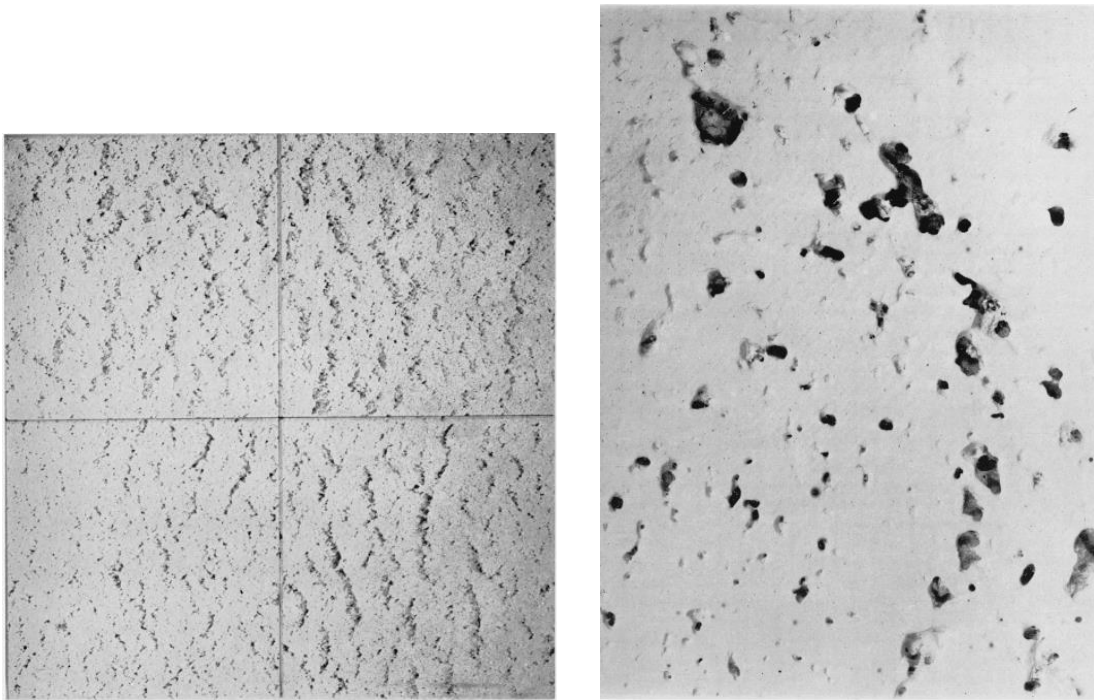


Figura 3.5 (esq.) – Aparência geral da amostra 3 [13]

Figura 3.6 (dir.)– Aparência da superfície da amostra 3 depois de ser pintada com cinco camadas de tinta, $1^{2/3}$ de magnificação [13]

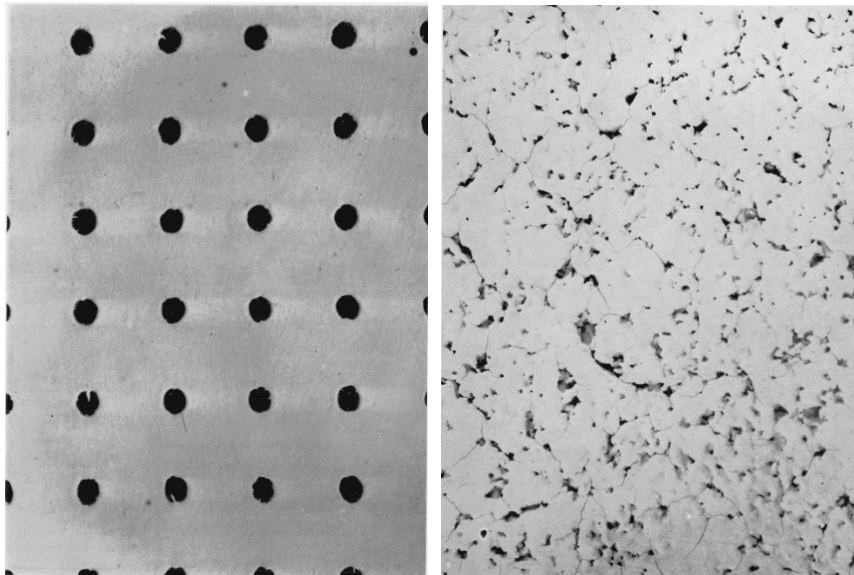


Figura 3.7 (esq.) – Aparência da superfície da amostra 4 depois de ser pintada, $1^{2/3}$ de magnificação [13]

Figura 3.8 (dir.) – Superfície da amostra 6 pintada pelo fabricante, $1^{2/3}$ de magnificação [13]



Figura 3.9 – Superfície da amostra 9, $1^{2/3}$ de magnificação [13]

Os resultados dos testes estão expostos no quadro 3.1:

Quadro 3.1 – Valores do coeficientes de absorção sonora obtidos [13]

Amostra	Acabamento	Coeficiente de absorção sonora por frequência (Hz)						NCR
		128	256	512	1k	2k	4k	
1	Sem tinta	0,09	0,24	0,62	0,89	0,73	0,73	0,60
1a	5 camadas por pincel	0,14	0,49	0,83	0,61	0,30	0,22	0,55
2	Pintada pelo fabricante	0,07	0,22	0,54	0,87	0,78	0,77	0,60
2a	5 camadas por 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 camadas por pincel	0,12	0,42	0,81	0,74	0,61	0,49	0,65
4	Pintada pelo fabricante	0,10	0,30	0,78	0,85	0,59	0,42	0,65
4a	4 camadas por 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	7 camadas por spray	0,18	0,50	0,79	0,74	0,71	0,67	0,70
5b	5 camadas por pincel	0,25	0,41	0,61	0,47	0,34	0,36	0,45
6	Pintada pelo fabricante	0,07	0,25	0,70	0,63	0,53	0,63	0,55
6a	4 camadas por 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 camadas por pincel	0,56	0,78	0,70	0,54	0,53	0,59	0,65
8	Pintada pelo fabricante	0,57	0,71	0,80	0,56	0,51	0,52	0,65
8a	4 camadas por pincel	0,58	0,76	0,51	0,28	0,25	0,13	0,45
9	Pintada pelo fabricante	0,12	0,40	0,68	0,63	0,60	0,68	0,60
9a	5 camadas por pincel	0,20	0,26	0,31	0,22	0,18	0,23	0,25

Através da observação dos valores obtidos pela realização dos testes pode-se concluir que, no caso da amostra 1 e 2 a pintura causou uma diminuição da absorção de altas frequências, mas por outro lado é possível também observar um aumento da absorção na frequência de 512 Hz. Este

aumento deve-se ao facto de o espaçamento das fibras ser tão grande que pode maximizar a absorção de baixas frequências ao fechar parcialmente os poros superficiais. Devido ao facto de o bom comportamento acústico em salas de escritório estar interligado com a absorção de altas frequências, a pintura deste tipo de materiais não é aconselhada.

Na amostra 3 o efeito da pintura é igual ao das amostras 1 e 2 no que toca às altas frequências, mas devido à sua estrutura, ser mais compacta com poros mais pequenos, não ocorre um aumento da absorção sonora nos 512 Hz.

A amostra 4 não apresenta grandes mudanças devido ao facto de se tratar de um material perfurado o que inviabiliza o efeito da tinta no seu método de absorção, só haveria modificação dos valores de absorção se o material fosse coberto inteiramente por uma película ou tecido que tapassem os buracos presentes no material.

A amostra 5 apresenta o mesmo comportamento face à pintura como a 3, devido aos mesmos fatores.

Na amostra 6 interpreta-se que a diminuição da absorção sonora a altas frequências deve-se ao facto de os poros menores ficarem tapados pela tinta apesar dos de maior dimensão ficarem abertos (figura 3.10).

Na amostra 8 a pintura criou uma camada quase lisa tendo aberturas ocasionais do tamanho da cabeça de um alfinete destruindo a capacidade de absorção sonora do material (figura 3.11). Pelo contrário, na amostra 7 devido ao acabamento proporcionado pelo fabricante, quando se foi pintar não foi possível criar uma camada lisa uniforme (figura 3.12) como no caso da amostra 8, havendo então uma menor perda da capacidade de absorção.

A amostra 9 depois de ser pintada com uso de um pincel perde a sua porosidade superficial, dissipando então a sua capacidade de absorção sonora. Recomenda-se a pintura a *spray* para evitar uma repetição dos resultados do teste, mesmo assim utilizando a pintura através de *spray* é preciso ter cuidado para não aplicar demasiada tinta.

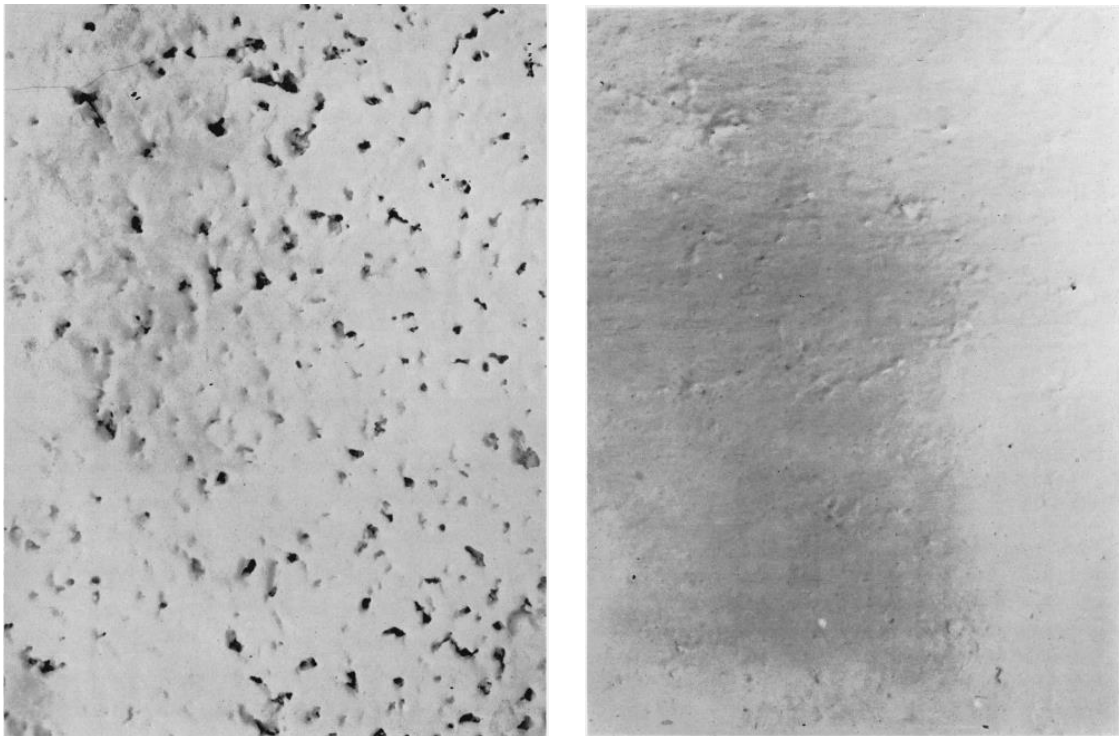


Figura 3.9 (esq.)- Superfície da amostra 6 quando pintada com 4 camadas adicionais de tinta, $1^{2/3}$ de magnificação [13]

Figura 3.10 (dir.)- Superfície da amostra 8a quando pintada com cinco camadas adicionais de tinta, $1^{2/3}$ de magnificação [13]

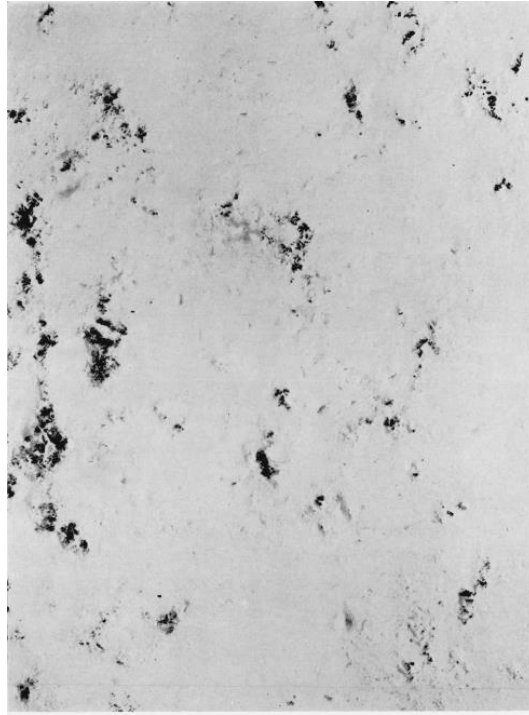


Figura 3.11- Superfície da amostra 7a quando pintada com 4 camadas adicionais de tinta, $1^{2/3}$ de magnificação [13]

4

ENSAIOS EXPERIMENTAIS

4.1. METODOLOGIA DOS ENSAIOS

4.1.1. MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Os testes em câmara reverberante foram realizados no Laboratório de Acústica da FEUP na câmara denominada de *RI*, segundo as indicações da norma NP EN ISO 354 [14].

A câmara *RI* apresenta um volume de aproximadamente 210 m³ com uma forma trapezoidal para fomentar a formação de um campo sonoro difuso.

De forma a ajudar na criação de um campo sonoro difuso, em adição à forma da câmara, foram instalados, dentro desta, painéis difusores suspensos.

Quanto o volume de uma câmara difere de 200 m³ os valores de área de absorção sonora equivalente máximos de referência, apresentados na norma, devem ser multiplicados por um fator de $(V/200)^{2/3}$. Para a *RI* os valores resultantes desta correção estão apresentados no Quadro 4.1.

No método da câmara reverberante, segundo a norma, a área do provete ensaiado deve estar compreendida entre 10 e 12 m². No caso da câmara ter um volume maior que 200 m³ o limite superior deve ser multiplicado por um fator de $(V/200)^{2/3}$, obtendo-se para a câmara *RI*, com um volume de 210 m³, um limite superior de 12,4 m². De preferência, os provetes devem ser de forma retangular e colocados de forma a não ficarem paralelos às paredes com um espaçamento de 1 m destas. Nos ensaios realizados as amostras foram colocadas no piso da câmara conforme as especificações.

Quadro 4.1 – Valores de área de absorção sonora equivalente máximos corrigidos para um volume igual a 210 m^3 .

Banda de Frequência (Hz)	Área de absorção sonora equivalente (m^2)	Frequência (Hz)	Área de absorção sonora equivalente (m^2)
100	6,7	800	6,7
125	6,7	1000	7,2
160	6,7	1250	7,7
200	6,7	1600	8,2
250	6,7	2000	9,8
315	6,7	1500	10,8
400	6,7	3150	12,4
500	6,7	4000	13,4
630	6,7	5000	14,4

Dois fatores também importantes que influenciam as medições do tempo de reverberação são as variações de temperatura e humidade relativa. Desta forma é aconselhado que se mantenham as condições de temperatura e humidade entre medições, com ou sem provete, estando estipulado pela norma que a humidade relativa deve estar compreendida entre 30% e 90% e com uma temperatura maior que 15°C .

Na medição dos valores do tempo de reverberação existem dois métodos, expostos pela norma, para a medição da curva de decaimento: o método do ruído interrompido e o método de resposta impulsiva. O primeiro, que foi o utilizado nos ensaios, resulta de um processo estatístico, sendo necessário calcular a média de várias curvas de decaimento, ou tempos de reverberação, medidos para uma posição de fonte/microfone de forma a obter uma repetibilidade adequada. O segundo método, é uma função determinística sem propensão a desvios estatísticos, contudo esta técnica requer equipamentos e métodos de processamento de resultados mais sofisticados. [14]

As combinações fonte/microfone devem ser pelo menos doze com um mínimo de três posições diferentes do microfone e duas da fonte sonora. As posições dos microfones têm de ter no mínimo 1,5 m de espaço entre si e 2 m da fonte, por outro lado as posições das fontes têm de ter um afastamento mínimo de 3 m.

Nos ensaios utilizaram-se quatro posições de microfones e três da fonte sonora, obtendo-se as doze combinações, visíveis no esquema seguinte (figura 4.1):

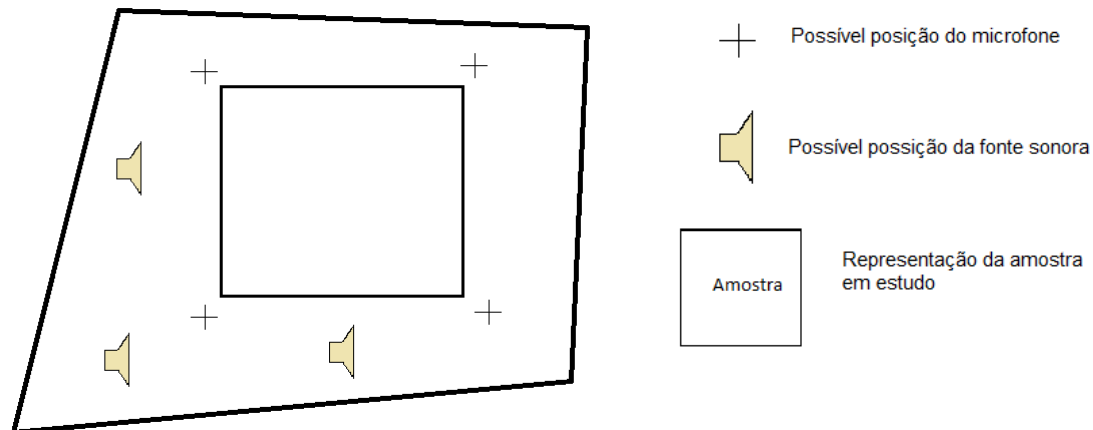


Figura 4.1 – Esquema da posição amostra, na câmara reverberante R1, e das possíveis posições do microfone e da fonte sonora que possibilitam as 12 combinações necessárias para o cumprimento da norma.

No método do ruído interrompido a fonte sonora deve emitir um som que apresente um espectro contínuo de banda larga ou banda estreita. Neste caso de estudo foi utilizada um fonte que produz um espectro de banda larga (ruído branco) e um analisador de tempo real, sendo que a norma estipula que a diferença nos níveis de pressão sonora resultantes na câmara sejam menores que 6 dB em bandas de terço de oitavas adjacentes e que o nível de excitação deve ser suficientemente longo para produzir níveis de pressão sonora constantes nas várias bandas de frequências. [11]

O cálculo da média pode ser feito a através da seguinte expressão (4.1),

$$L_p(t) = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{pn}(t)}{10}} \right] \quad (4.1)$$

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 .

Os equipamentos utilizados durante os ensaios foram:

- Sonómetro *Bruel & Kjaer 2260 Sound Level Investigator*
- Fonte sonora semiomnidirecional *Bruel & Kjaer Type 4224 Sound Source*

4.1.2. CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

Através dos ensaios descritos anteriormente, obtêm-se os valores do tempo de reverberação médios sem e com provete, respetivamente T_1 e T_2 .

O coeficiente de absorção sonora α_s é calculada através da expressão (4.2):

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (4.2)$$

Onde,

- α_s – Coeficiente de absorção sonora da amostra obtido no ensaio;
- A_T – Área de absorção sonora equivalente da amostra de ensaio (m^2);
- S – Área da amostra de ensaio (m^2).

A área A_T é calculada pela subtração da área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante com a amostra (A_2) e sem amostra (A_1), estas por sua vez podem ser calculadas pela expressão (4.3) e (4.4), respectivamente.

$$A_2 = \frac{55,3V}{c_2 T_2} - 4m_2 V \quad (4.3)$$

$$A_1 = \frac{55,3V}{c_1 T_1} - 4m_1 V \quad (4.4)$$

Em que,

- V é o volume da câmara reverberante vazia (m^3);
- c é a velocidade de propagação do som no ar (m/s) calculada através da expressão 4.5 (válida para temperaturas entre 15°C e 30°C);
- T é o tempo de reverberação da câmara no ensaio correspondente (s);
- m é o coeficiente de atenuação devido à presença do ar, em metros recíprocos (calculado através da expressão 4.6).

$$c = (331 + 0,6t) \quad (4.5)$$

$$m = \frac{\alpha}{10 \cdot \log(e)} \quad (4.6)$$

4.2. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

4.2.1. AGLOMERADO COMPOSTO DE CORTIÇA

Para o estudo da influência da pintura no coeficiente de absorção sonora, testaram-se quatro amostras de um aglomerado composto de cortiça. As amostras vieram em placas de 930x620 mm com espessuras de 2 e 6 mm, isto é, havia duas amostras com 2 mm de espessura e duas com 6 mm (figura 4.2 e 4.3). Importante referir também que as placas vinham identificadas por uma referência que indicava que o material que constituía as placas era diferente. O Quadro 4.2 ilustra as características de cada tipo de amostra.



Figura 4.2(esq.) e 4.3 (dir.) – Etiquetas presentes nos painéis de cortiça, nas quais estão indicadas as características de cada painel. [Foto do autor]

Quadro 4.2 –Características dos painéis usados nos ensaios.

Designação	Espessura (mm)	Referência	Massa específica (Kg/m ³)	Dimensão do granulado (mm)	Resistência à tração (kPa)
C6	6	8122	422	0,5/1	≥ 1700
C2	2	8122	421	0,5/1	≥ 1700
C6leve	6	8003	194	0,5/1	≥ 400
C2leve	2	8003	191	0,5/1	≥ 400

As placas com a referência 8003 não são só mais leves do que as de referência 8122, mas também mais maleáveis e flexíveis, indicadores de uma menor densidade deste material.

Com painéis de área superficial de 0,576 m² foi preciso juntar 18 para obter um provete com área de 10,37 m³, os painéis foram colocados no chão conforme a figura 4.4.



Figura 4.4 – Disposição das placas no piso da câmara reverberante para o ensaio.[Foto do autor]

Os painéis de cortiça, depois de realizados os primeiros testes, foram pintados com uma tinta plástica mate de cor clara, com um código de Código NCS 1950 de NCS S 1002-Y50R, (figura 4.5 e 4.6). Após pintados os painéis ficaram a secar no mínimo durante um dia e quando secos foram guardados de forma evitar a acumulação de pó na superfície destes. Devido à quantidade de painéis o processo de pintura e de secagem demorou mais que um dia tendo os ensaios dos painéis pintados só começado depois do último painel estar seco (aproximadamente 4 dias depois do começo da fase de pintura).

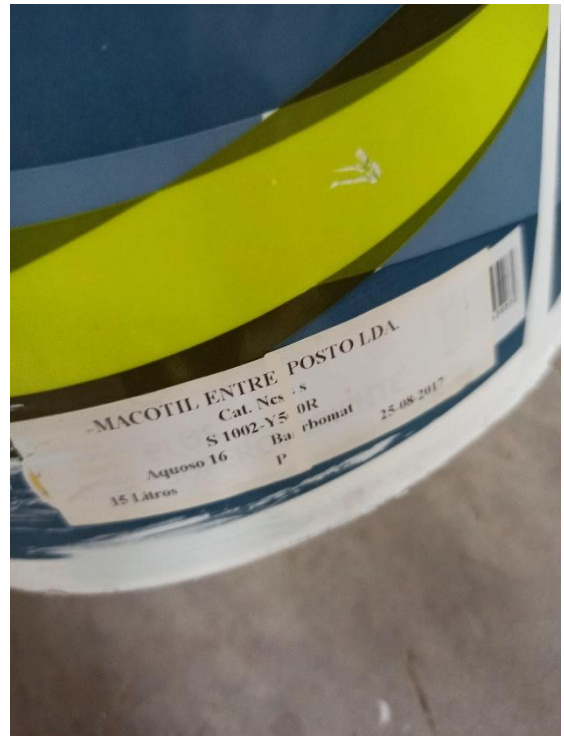


Figura 4.5 (esq.) – Tinta plástica mate utilizada para pintar as amostras de aglomerado composto de cortiça testadas. [Foto do autor]

Figura 4.6 (dir.) - Pormenor do rótulo de identificação da tinta utilizada para pintar as amostras de aglomerado composto de cortiça. [Foto do autor]

Com o objetivo de obter uma pintura uniforme, todos os painéis foram pintados com um rolo dando uma única camada de tinta cobrindo a superfície total de um lado dos painéis. (figura 4.7)



Figura 4.7 –Exemplo de um painel de aglomerado composto de cortiça após ser pintado. [Foto do autor]

4.2.2. *BASWAPHON FINE 30 MM*

O *BASWaphon FINE 30 mm* é constituído por placas de lã mineral que depois de fixadas sobre a zona de aplicação são revestidas de uma ou várias camadas de material mineral de forma a obter uma superfície lisa e homogénea, no caso em estudo a superfície de lã mineral foi coberta com uma massa de barramento de resina sintética visível na figura 4.8.



Figura 4.8 –Pormenor de um canto de um painel da amostra de *BASWAphon Fine 30 mm*, onde é visível a massa de barramento (material branco) aplicada na superfície das camadas de *BASWAphon Fine* (material amarelo). [Foto do autor]

O *BASWAphon* pode ser aplicado em paredes ou tetos em sistemas maciços ou suspensos (figura 4.9 e 4.10, respetivamente) e o absorvente sonoro varia em espessura, existindo em configurações de 30,50 e 70 mm. Como é possível concluir pelo nome desta a configuração em estudo é a de 30 mm.

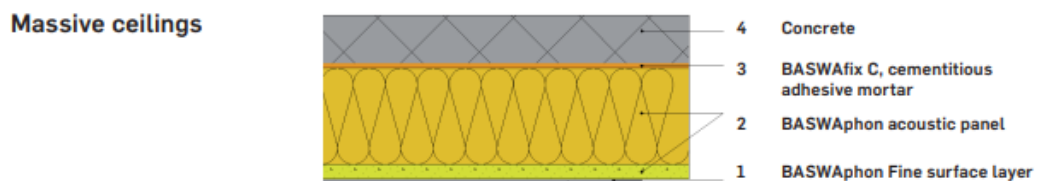


Figura 4.9 –Esquema da aplicação de *BASWAphon Fine* em sistemas maciços.

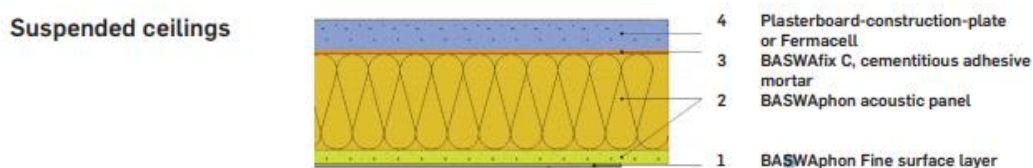


Figura 4.10 – Esquema da aplicação de *BASWAphon Fine* em sistemas de tetos suspensos.

Segundo a documentação técnica o *BASWAphon FINE 30 mm* antes de ser pintado terá valores de coeficiente de absorção sonora semelhantes aos visíveis no quadro 4.3.

Quadro 4.3 –Valores de coeficientes de absorção sonora (α_s) previstos para uma amostra de *BASWAphon FINE 30 mm* montada num sistema maciço.

Frequência (Hz)	α_s
100	0,06
125	0,11
160	0,20
200	0,25
250	0,34
315	0,68
400	0,73
500	0,81
630	0,83
800	0,84
1000	0,81
1250	0,77
1600	0,72
2000	0,68
2500	0,65
3150	0,63
4000	0,59
5000	0,55

A amostra de *BASWaphon FINE 30 mm* testada é constituída por 20 painéis dispostos de forma retangular, totalizando uma área de 9,60 m² (3,00x3,20 m²). Apesar da área desta amostra ser menor que a área mínima estipulada pela norma NP EN ISO 354, os valores de α_s obtidos durante os testes não deverão sofrer alterações.

A medição do tempo de reverberação da amostra de *BASWaphon FINE 30 mm* foi realizado em duas etapas, pré pintura e pós pintura.

Esperou-se um dia entre a aplicação do material que cobre o *BASWaphon FINE 30 mm* e a realização dos testes em camara reverberante de forma a dar tempo suficiente para o material secar e solidificar, da mesma forma após a aplicação da tinta também foi dado um intervalo de um dia até a realização dos testes.

A tinta aplicada na superfície da amostra consiste numa tinta de silicato especificada pelo fabricante da mostra de *BASWaphon FINE*. A aplicação da tinta foi feita através do uso de um rolo, como é visível nas figuras 4.11 e 4.12.



Figura 4.11 – Pintura de um painel da amostra de *BASWaphon Fine 30 mm*. [Fotos cedidas pelo fabricante]



Figura 4.12 –Pormenor da pintura da amostra onde é possível ver a diferença mínima entre a cor da massa de barramento e a cor da tinta. [Fotos cedidas pelo fabricante]

5

RESULTADOS

5.1. AGLOMERADO COMPOSTO DE CORTIÇA

5.1.1. RESULTADOS NAS QUATRO AMOSTRAS

No Quadro 5.1 estão dispostos os valores do coeficiente de absorção sonora (α_s) obtidos pelos ensaios realizados às quatro amostras na câmara reverberante *antes* e *depois* da pintura.

É possível verificar uma diferença do comportamento sonoro entre as amostras mesmo antes da pintura: notando-se um aumento da absorção sonora para as amostras “leves” em comparação às suas parceiras mais rígidas e a variação da zona de maior eficácia com a diminuição da densidade. As figuras 5.1 e 5.2 demonstram estas diferenças resultantes da variação entre as amostras *C6/C6-leve* e *C2/C2-leve*, respectivamente.

Uma possível explicação para este aumento de absorção sonora entre amostras 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.

Quadro 5.1 – Coeficientes de absorção sonora (α_s) das quatro amostras de aglomerado composto de cortiça antes e depois de pintadas.

Tipo	C6		C2		C6-leve		C2-leve	
	Antes da pintura	Depois da pintura	Antes da pintura	Depois da pintura	Antes da pintura	Depois da pintura	Antes da pintura	Depois da pintura
100	0,04	0,01	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03
125	0,03	0,01	0,04	0,01	0,03	0,01	0,02	0,03
160	0,01	0,03	0,02	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03
200	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02
250	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02
315	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,04	0,00	0,01
400	0,01	0,02	0,00	0,01	0,02	0,05	0,00	0,01
500	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,07	0,00	0,01
630	0,03	0,02	0,01	0,02	0,05	0,11	0,00	0,01
800	0,07	0,03	0,01	0,02	0,07	0,16	0,01	0,01
1k	0,15	0,09	0,03	0,03	0,14	0,27	0,01	0,03
1,25k	0,14	0,15	0,05	0,04	0,24	0,37	0,01	0,03
1,6k	0,12	0,18	0,08	0,09	0,42	0,30	0,02	0,06
2k	0,09	0,18	0,14	0,16	0,46	0,22	0,04	0,16
2,5k	0,07	0,15	0,19	0,23	0,41	0,15	0,08	0,25
3,15k	0,04	0,09	0,22	0,25	0,34	0,10	0,13	0,40
4k	0,06	0,07	0,24	0,22	0,31	0,07	0,26	0,28
5k	0,06	0,06	0,20	0,15	0,33	0,07	0,38	0,14

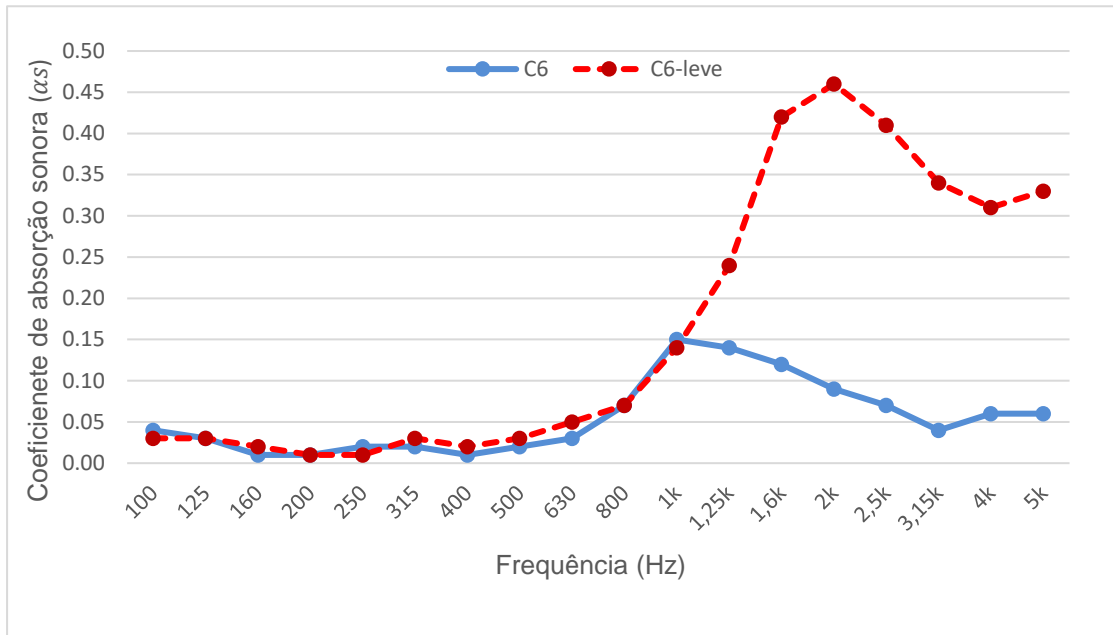


Fig. 5.1 – Valores do coeficiente de absorção sonora das amostras C6 e C6-leve (aglomerado composto de cortiça).

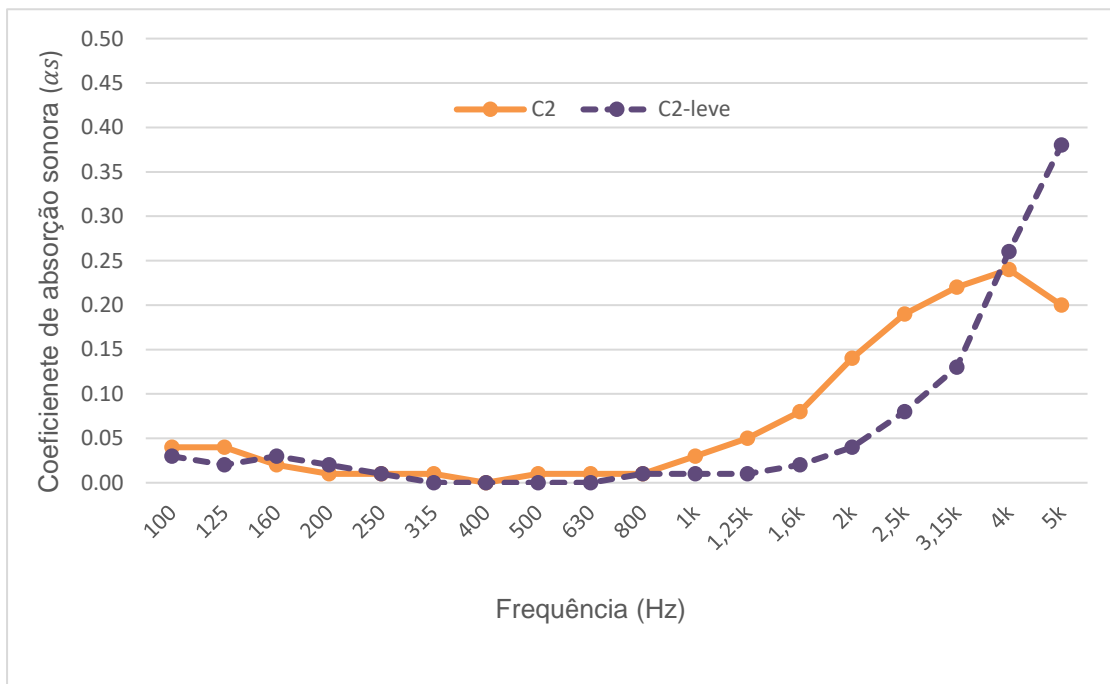


Fig. 5.2 – Valores do coeficiente de absorção sonora das amostras C2 e C2-leve (aglomerado composto de cortiça).

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

Segundo os valores de $\Delta\alpha_s$ (variação dos valores do coeficiente de absorção sonora) presentes no quadro 5.2 deteta-se um aumento na capacidade de absorção após a pintura no caso da amostra C6. No entanto, para as outras amostras verifica-se o contrário. Também é possível observar um segundo efeito da pintura nas figuras 5.3 a 5.6, que se trata da deslocação das zonas de maior eficácia de absorção sonora.

Quadro 5.2 –Diferenças entre os valores do coeficiente de absorção sonora ($\Delta\alpha_s$) das amostras C6, C2, C6-*leve*, C2-*leve*, de aglomerado composto de cortiça, *depois* e *antes* da pintura.

Banda de frequência (Hz)	$\Delta\alpha_s (= \alpha_{depois} - \alpha_{antes})$			
	C2	C2- <i>leve</i>	C6	C6- <i>leve</i>
100	-0,01	0,00	-0,03	-0,01
125	-0,03	0,01	-0,02	-0,02
160	-0,01	0,00	0,02	0,01
200	0,01	0,00	0,02	0,01
250	0,00	0,01	-0,01	0,01
315	0,01	0,01	0,00	0,01
400	0,00	0,01	0,01	0,03
500	0,01	0,01	0,00	0,04
630	0,01	0,01	-0,01	0,06
800	0,01	0,00	-0,04	0,09
1k	0,00	0,02	-0,06	0,13
1,25k	-0,01	0,02	0,01	0,13
1,6k	0,01	0,04	0,06	-0,12
2k	0,02	0,12	0,09	-0,24
2,5k	0,04	0,17	0,08	-0,26
3,15k	0,03	0,27	0,05	-0,24
4k	-0,02	0,02	0,01	-0,24
5k	-0,05	-0,24	0,00	-0,26

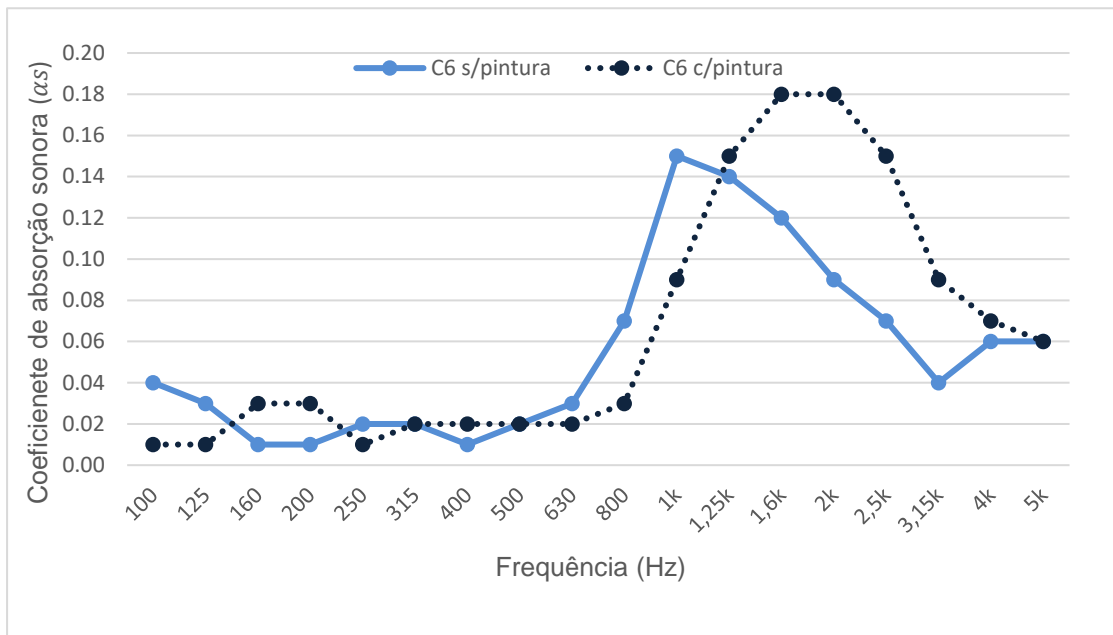


Fig. 5.3 – Valores do coeficiente de absorção sonora (α_s) da amostra C6 (aglomerado composto de cortiça) antes e depois da pintura.

No caso da amostra C6 a pintura causou um aumento da capacidade de absorção sonora em altas frequências, de um valor de α_s de 0,15 (a 1000 Hz) para um α_s de 0,18 (a 1600 Hz). Apesar deste aumento a amostra C6 continua a ser a mais fraca em termos de absorção sonora. Este fenómeno do aumento da absorção sonora a altas frequências pode dever-se ao facto de ao pintar-se a superfície do material, os maiores poros ficarem tapados aumentando o número de poros de pequena dimensão. Esta hipótese é suportada pela diminuição da absorção sonora de baixas frequências face à amostra sem tinta.

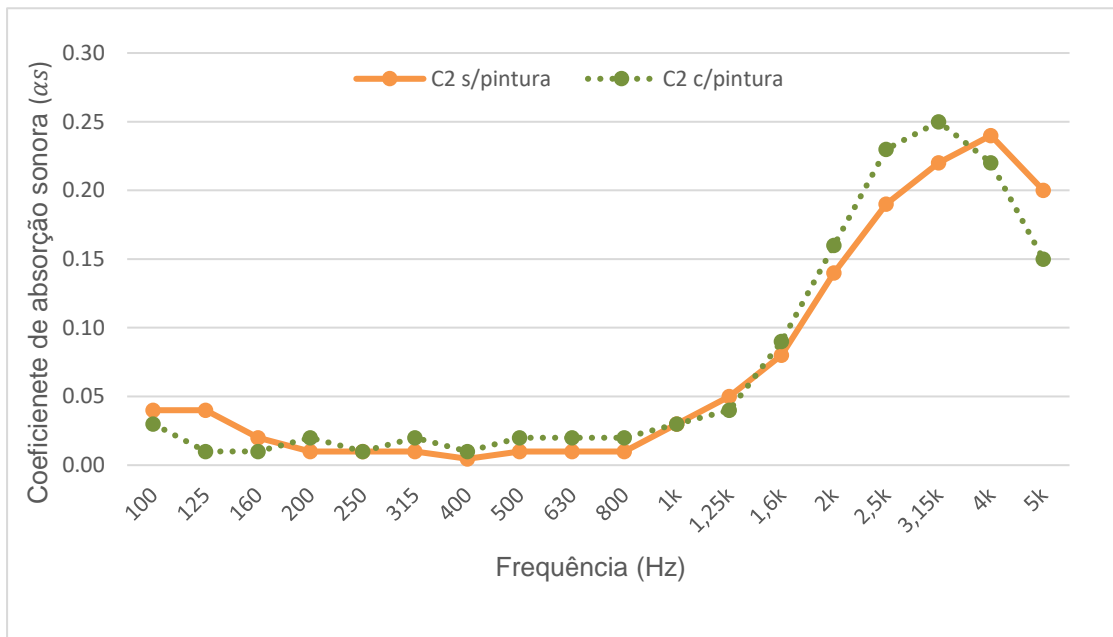


Fig. 5.4 – Valores do coeficiente de absorção sonora (α_s) da amostra C2 (aglomerado composto de cortiça) *antes e depois* da pintura.

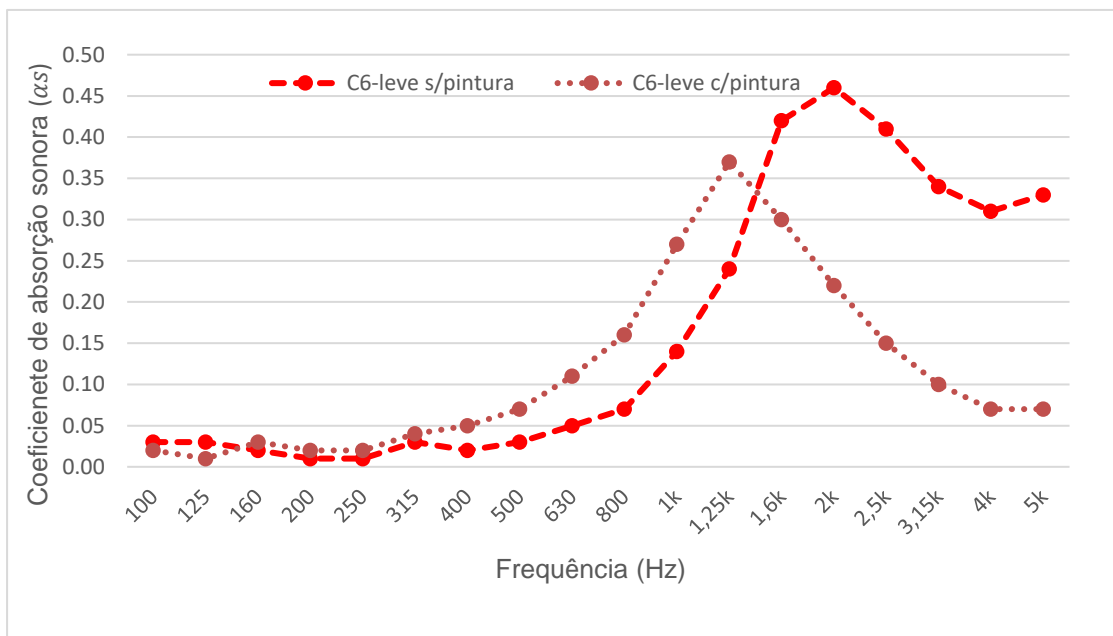


Fig. 5.5 – Valores do coeficiente de absorção sonora (α_s) da amostra C6-leve (aglomerado composto de cortiça) *antes e depois* da pintura.

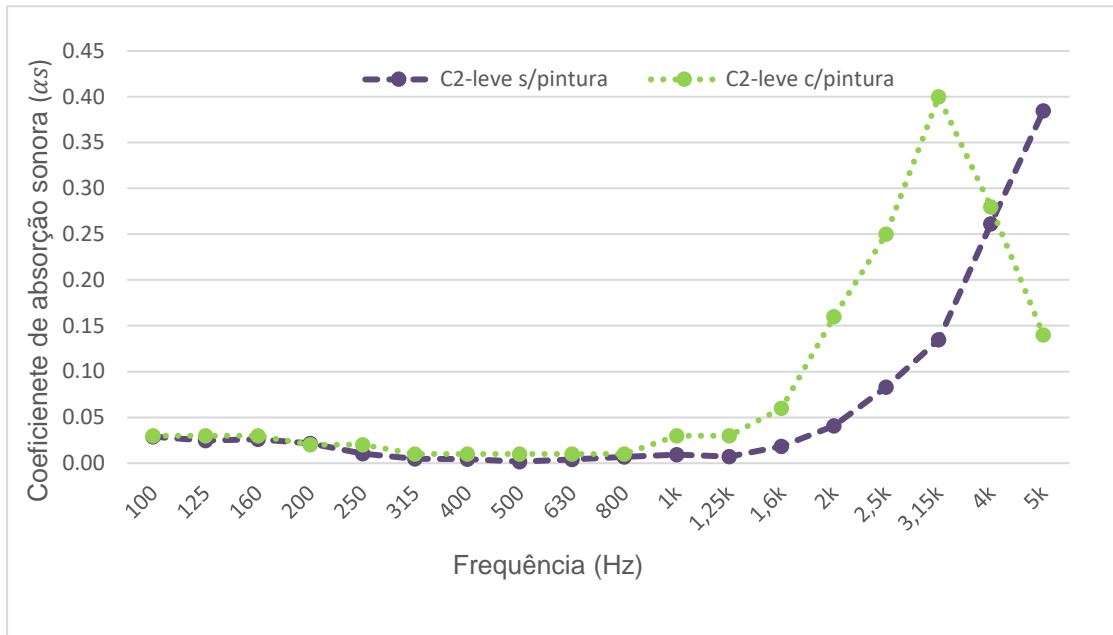


Fig. 5.6 – Valores do coeficiente de absorção sonora (α_s) da amostra C2-leve (aglomerado composto de cortiça) antes e depois da pintura.

No caso das restantes amostras de aglomerado composto de cortiça a pintura prejudicou o seu comportamento acústico. Em todas as amostras é possível ver a variação das zonas de maior eficácia, de frequências altas para mais baixas bem como a diminuição dos valores do coeficiente de absorção sonora. Estes resultados são semelhantes aos esperados e já documentados em trabalhos anteriores.

5.1.3. NOISE REDUCTION COEFFICIENT E α_w

O *NRC* (*Noise Reduction Coefficient*) é um parâmetro útil para compreender o efeito global da absorção sonora pois este consiste na média aritmética dos valores de α nas bandas de oitava dos 250 aos 2000 Hz. No quadro 5.3 estão visíveis os valores de *NRC* obtidos pelos testes das amostras de aglomerado composto de cortiça.

Quadro 5.3 – Valores de *NRC* obtidos para as amostras C6, C2, C6-Leve, C2-leve antes e depois da pintura.

	C2	C2-leve	C6	C6-Leve	C2-Pintada	C2-leve Pintada	C6-Pintada	C6-leve Pintada
<i>NRC</i>	0,05	0	0,05	0,15	0,05	0,05	0,10	0,15
<i>Varição</i> (= $NRC_{depois} - NRC_{antes}$)			-		0,00	+0,05	+0,05	0,00

No caso das amostras *C2-leve* e *C6* o valor de *NRC* parece ter melhorado com a pintura. Mais detalhadamente, na amostra *C2-leve* este aumento deve-se ao facto que depois de pintadas as zonas de maior eficácia de absorção variam para frequências mais baixas e sendo que o parâmetro *NRC* contabiliza somente os efeitos sentidos nas bandas de oitava dos 250 aos 2000, o efeito de variação da chamada zona de maior eficácia é traduzido beneficemente no *NRC*. No caso da amostra *C6* o aumento do *NRC* após a pintura deve-se, simplesmente, ao aumento dos valores de α_s , referidos anteriormente. As amostras *C6-leve* e *C2* mantêm o valor de *NRC* em ambas as fases de teste, devido a dois efeitos conflituantes, o primeiro é a diminuição dos valores de α_s , como na amostra *C6-leve*, e o segundo é a variação das frequências em que se observa a maior eficácia de absorção para frequências mais baixas.

Outro possível indicador do efeito da tinta nas amostras é o parâmetro “médio” α_w que é por vezes acompanhado por uma letra “indicadora de forma”. Dependendo do valor de α_w é atribuído uma classe de absorção sonora à amostra: *não classificada* ($\alpha_w \leq 0,10$), *E* ($0,15 \leq \alpha_w \leq 0,25$), *D* ($0,30 \leq \alpha_w \leq 0,55$), *C* ($0,6 \leq \alpha_w \leq 0,75$), *B* ($0,80 \leq \alpha_w \leq 0,85$) e *A* ($\alpha_w \geq 0,90$). No Quadro 5.4 estão representados os valores de α_w , classe de absorção sonora e a variação de α_w causada pela pintura das amostras.

Os valores α_w reforçam as conclusões retiradas através dos valores de *NRC*, mas adicionam um novo identificador do efeito da pintura através da sua letra “indicadora de forma” que indica que em várias amostras deu-se um “abatimento” da curva de coeficientes de absorção.

Quadro 5.4 – Valores de α_w obtidos para as amostras *C6*, *C2*, *C6-leve*, *C2-leve* antes e depois da pintura. *nc*- *não classificado*

	<i>C2</i>	<i>C2-leve</i>	<i>C6</i>	<i>C6-leve</i>	<i>C2-Pintada</i>	<i>C2-leve Pintada</i>	<i>C6-Pintada</i>	<i>C6-leve Pintada</i>
α_w	0,05 (H)	0,05	0,10	0,10 (M-H)	0,05 (H)	0,05 (H)	0,10	0,15
Classe	<i>nc</i>	<i>nc</i>	<i>nc</i>	<i>nc</i>	<i>nc</i>	<i>nc</i>	<i>nc</i>	<i>E</i>
Variação (= α_w depois- α_w antes)			-		0,00	0,00	0,00	0,05

5.2. BASWAPHON

Os resultados dos testes realizados na amostra de *BASWaphon Fine 30 mm* estão expostos no Quadro 5.5 onde se agruparam os resultados em *antes* e *depois* da aplicação da tinta.

Quadro 5.5 – Valores dos coeficientes de absorção sonora dos testes em câmara reverberante da amostra de *BASWaphon Fine 30 mm*.

Frequência (Hz)	Antes da pintura	Depois da pintura	$\Delta\alpha$	Frequência (Hz)	Antes da pintura	Depois da pintura	$\Delta\alpha$
100	0,02	0,03	0,01	800	0,94	0,47	-0,47
125	0,09	0,12	0,03	1k	0,97	0,50	-0,47
160	0,13	0,21	0,08	1,25k	1,01*	0,43	-0,58
200	0,21	0,43	0,22	1,6k	0,95	0,36	-0,59
250	0,28	0,48	0,20	2k	0,91	0,31	-0,60
315	0,49	0,50	0,01	2,5k	0,86	0,27	-0,59
400	0,66	0,48	-0,18	3,15k	0,79	0,23	-0,56
500	0,75	0,46	-0,29	4k	0,73	0,18	-0,55
630	0,88	0,48	-0,40	5k	0,73	0,16	-0,57

*A existência um valor de α_s maior que 1,0 é impossível fisicamente, mas não matematicamente (pelo algoritmo de cálculo de acordo com a norma). Neste caso este valor deve-se ao facto de existir uma zona absorvente exposta, 30 mm na vertical do perímetro da amostra. Tal não causaria efeito se a amostra tivesse pouca espessura, como no caso das amostras de aglomerado composto de cortiça (2 e 6 mm) ao contrário desta amostra (30 mm de espessura, que não estando quantificada causa um valor de α_s maior que o real. Ora, uma área vertical no perímetro de 0,372 m^2 representa cerca de 4% da área total em planta. Assim os valores de α_s poderão estar inflacionados em cerca de 0,04. Contudo tal situação em nada afeta o valor da variação dos α_s de *antes* e *depois* da pintura.

Analisando os resultados é visível uma grande diferença nos valores antes e após pintura. Nas figuras 5.7 e 5.8 é possível analisar a evolução dos valores do coeficiente de absorção sonora antes de ser aplicada a tinta e depois da aplicação desta. Na figura 5.8, os valores de $\Delta\alpha_s$ consistem na diferença dos coeficientes de absorção das amostra *com* e *sem* tinta.

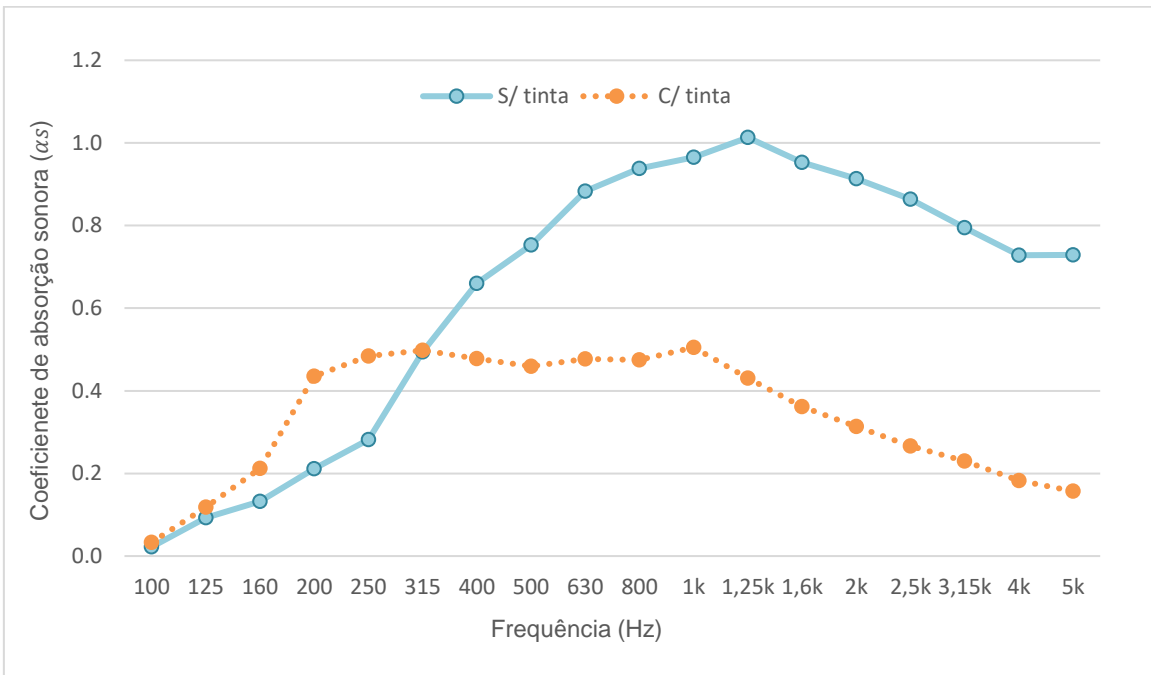


Fig. 5.7 – Evolução dos valores do coeficiente de absorção sonora na amostra de *BASWaphon Fine 30 mm* antes e após a sua pintura.

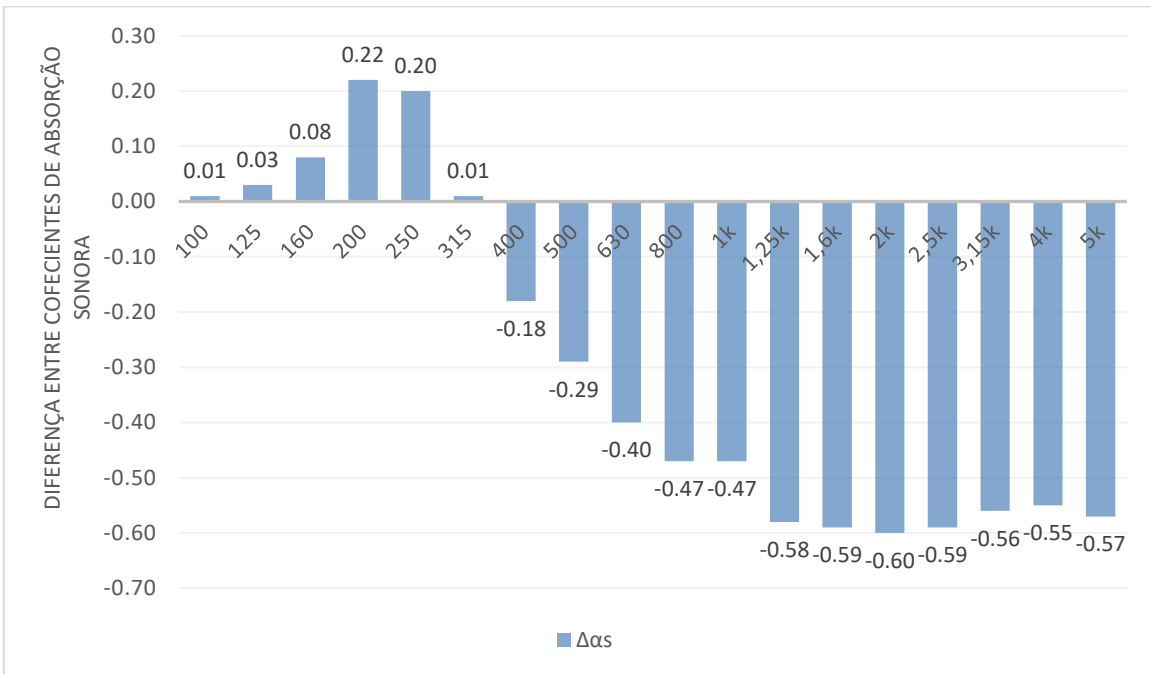


Fig. 5.8 –Valores de $\Delta\alpha_s$ nas bandas de frequência de 1/3 de oitava dos 100 aos 5000 Hz.

Através das figuras 5.7 e 5.8 é possível verificar um aumento do valor de α_s a baixas frequências (100 a 315 Hz) ao contrário do resto do espectro onde existe uma considerável diminuição da capacidade de absorção sonora. A diminuição da capacidade de absorção sonora é de tal forma importante que em certas bandas de frequência a perda de capacidade de absorção chega aos 80%. Este impacto é facilmente compreendido através da figura 5.9 que apresenta em percentagem o ganho ou perda do valor de coeficiente de absorção sonora.

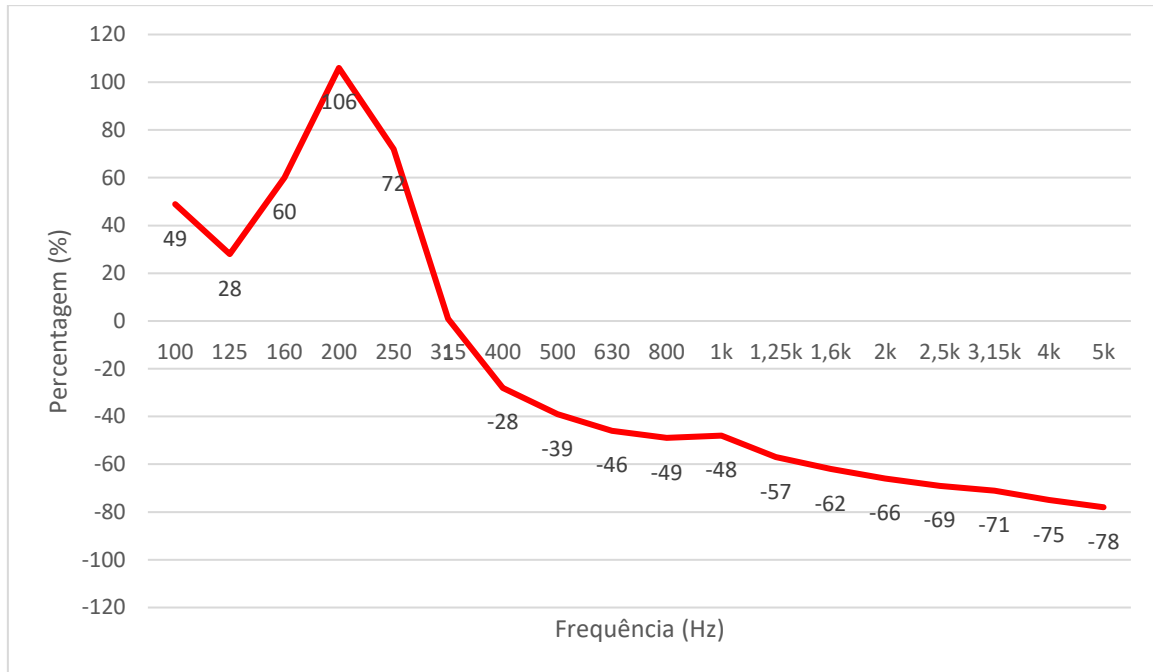


Fig.5.9 – Diferença em percentagem entre a capacidade de absorção sonora *depois* e *antes* da amostra *BASWAphon Fine 30 mm* ser pintada.

A aplicação da tinta reduziu a capacidade de o material agir como um material absorvente sonoro para altas frequências. O mesmo efeito é visível nas amostras de aglomerado de cortiça, mas como estas por si já não são inicialmente bons absorventes sonoros (ao contrário do aglomerado negro de cortiça) a perda não é tão acentuada.

A anterior afirmação é suportada pelos parâmetros NRC e α_w , ambos denominados de índices “médios” que ajudam a ter uma compreensão mais global do efeito da tinta. No quadro 5.6 é possível analisar os valores de NRC e α_w da amostra de *BASWAphon* *antes* e *depois* da aplicação da tinta.

Ambos os valores de NRC e α_w indicam uma perda substancial nas capacidades de absorção sonora, como previamente se afirmara. O parâmetro mais indicador deste efeito é o α_w pois não só apresenta um efeito “médio” de degradação das capacidades absorventes do material, mas também através da letra “indicadora de forma” apresenta a modificação do seu comportamento quanto às frequências absorvidas.

Quadro 5.6 – Valores de NRC e α_w obtidos para a amostra de *BASWAphon Fine 30 mm* antes e depois da pintura.

	<i>BASWAphon</i>	<i>BASWAphon</i> <i>barrado de branco</i>	<i>Variação</i>
<i>NRC</i>	0,75	0,40	-0,35
α_w	0,60 (M-H)	0,20 (L-M)	-0,40
Classe	<i>C</i>	<i>E</i>	-2 classes

6

CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES GLOBAIS

O presente trabalho teve como objetivo estudar o impacto que a pintura de materiais absorventes sonoros tem na sua capacidade de absorção sonora. Para tal, foram realizados testes em quatro amostras de aglomerado composto de cortiça e uma de *BAWSAphon (Fine 30 mm)*. Os testes realizados consistiram em quantificar a capacidade de absorção sonora dos materiais através do coeficiente de absorção sonora, *antes* e *depois* da aplicação da tinta.

De forma a estruturar os ensaios realizados e minimizar possíveis erros cometidos durante as medições, seguiu-se a norma NP EN ISO 354 podendo-se então obter valores de α_s experimentais.

No quadro 6.1 é possível observar a variação dos valores de α_s obtidos para as amostras de aglomerado composto de cortiça onde se pode concluir que existe uma diminuição dos valores de α_s após a pintura para a maior parte das amostras, tendo como exceção a amostra *C6*.

No quadro 6.2 segue o resumo da variação dos valores de *NRC* e o α_w , para as amostras do derivado da cortiça.

Mais especificamente na amostra de *C2* devido ao facto da zona onde se encontra os maiores valores de coeficiente sonoro se estender para além das bandas de 1/3 de oitava analisadas (>5 kHz) e aplicação da tinta não só baixar os valores de α_s mas também baixar as bandas de frequência onde se encontram os valores de α_s maiores, é possível à primeira vista retirar a conclusão que a pintura teve um efeito positivo, no entanto observando outros indicadores como o *NRC* e o α_w é possível concluir que os dois efeitos da tinta cancelam-se nesta amostra.

No caso da amostra *C2-leve* ocorreu um fenómeno semelhante á amostra *C2*, só que devido ao facto das bandas de frequência de maior eficácia serem maiores que 5000 Hz o impacto da pintura é considerado positivo apesar da diminuição do coeficiente de absorção sonora. Este fenómeno é refletido nos valores de *NRC*.

Na amostra *C6* o efeito da pintura foi benéfico, tendo o resultado oposto ao das outras amostras. Neste caso a aplicação da tinta não só aumentou os valores de coeficiente de absorção sonora, bem como moveu a zona de maior eficácia para frequência mais altas.

Por final a amostra *C6-leve* perde absorção sonora na zona das bandas de frequências dos 100 e 125 Hz e dos 1600 Hz aos 5000 Hz e o aumento desta nas restantes modifica o comportamento do material de um absorvente de altas frequências para um material absorvente de médias frequências.

Quadro 6.1 –Variação dos valores do coeficiente de absorção sonora ($\Delta\alpha_s$) das amostras C6, C2, C6-*leve*, C2-*leve*, de aglomerado composto de cortiça, *depois* e *antes* da pintura, em, valores absolutos e sobre a forma de percentagem ($\Delta\alpha_{sP}$ ($\alpha_{depois} - \alpha_{antes}$)/ α_{antes} (%))

Banda de frequência (Hz)	C2		C2- <i>leve</i>		C6		C6- <i>leve</i>	
	$\Delta\alpha_s$	$\Delta\alpha_{sP}$ (%)	$\Delta\alpha_s$	$\Delta\alpha_{sP}$ (%)	$\Delta\alpha_s$	$\Delta\alpha_{sP}$ (%)	$\Delta\alpha_s$	$\Delta\alpha_{sP}$ (%)
100	-0,01	-25	0,00	-8	-0,03	-75	-0,01	-33
125	-0,03	-75	0,01	25	-0,02	-67	-0,02	-67
160	-0,01	-50	0,00	18	0,02	200	0,01	50
200	0,01	100	0,00	-8	0,02	200	0,01	100
250	0,00	0	0,01	62	-0,01	-50	0,01	100
315	0,01	100	0,01	202	0,00	0	0,01	33
400	0,01	116	0,01	133	0,01	100	0,03	150
500	0,01	100	0,01	345	0,00	0	0,04	133
630	0,01	100	0,01	94	-0,01	-33	0,06	120
800	0,01	100	0,00	-6	-0,04	-57	0,09	129
1k	0,00	0	0,02	174	-0,06	-40	0,13	93
1,25k	-0,01	-20	0,02	359	0,01	7	0,13	54
1,6k	0,01	13	0,04	251	0,06	50	-0,12	-29
2k	0,02	14	0,12	285	0,09	100	-0,24	-52
2,5k	0,04	21	0,17	201	0,08	114	-0,26	-63
3,15k	0,03	14	0,27	200	0,05	125	-0,24	-71
4k	-0,02	-8	0,02	6	0,01	17	-0,24	-77
5k	-0,05	-25	-0,24	-65	0,00	0	-0,26	-79

Quadro 6.2 –Variação dos valores de NRC e α_w obtidos para as amostras de C2, C2-leve, C6 e C6-leve depois e antes da pintura.

Varição de	C2	C2-leve	C6	C6-leve
NRC	0,00	+0,05	+0,05	0,00
α_w	0,00	0,00	0,00	+0,05
Classe	-	-	+1 classe	-

Na amostra de *BAWSAphon (Fine 30 mm)* verifica-se um aumento dos valores de coeficiente de absorção sonora nas baixas frequências mas não se compara à diminuição que ocorreu na absorção em altas frequências. No quadro 6.3 é possível verificar os valores de $\Delta\alpha$ em que $\Delta\alpha = \alpha_{depois} - \alpha_{antes}$. Os valores de NRC e o α_w , suportam a conclusão de que a aplicação da tinta causou uma perda avultada da capacidade de absorção sonora, o resumo da variação destes índices está apresentado no Quadro 6.4.

Quadro 6.3 – Resumo dos valores de $\Delta\alpha$ calculados através dos resultados dos testes realizados na amostra de *BAWSAphon (Fine 30 mm)*.

Frequência (Hz)	$\Delta\alpha$	Frequência (Hz)	$\Delta\alpha$	Frequência (Hz)	$\Delta\alpha$
100	0,01	400	-0,18	1,6k	-0,59
125	0,03	500	-0,29	2k	-0,60
160	0,08	630	-0,40	2,5k	-0,59
200	0,22	800	-0,47	3,15k	-0,56
250	0,20	1k	-0,47	4k	-0,55
315	0,01	1,25k	-0,58	5k	-0,57

Quadro 6.4 – Variação dos valores de NRC e o α_w calculados através dos resultados dos testes realizados na amostra de *BAWSAphon (Fine 30 mm)*.

Variação	
NRC	-0,35
α_w	-0,40
Classe	-2 classes

Conclui-se assim que, semelhante aos resultados de estudos prévios, a aplicação de uma camada de tinta na superfície de materiais absorventes sonoros do tipo poroso e fibroso causa uma diminuição da absorção sonora do material e a transformação do comportamento sonoro destes, bem como a remota possibilidade de, em certos casos muito particulares, amostras com fraco comportamento sonoro poderem vir a ser um pouco melhoradas com a aplicação de uma camada de tinta à superfície.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Devido a constrangimentos de tempo e material, o trabalho executado não pôde ser mais detalhado. Desta forma para análise futura ficam enumerados vários aspetos onde é possível expandir o trabalho já realizado.

Numa abordagem futura a este tema seria importante o alargamento do tipo de amostras em estudo. Este trabalho focou-se em materiais absorventes só de duas categorias, bastante extremas nas suas capacidades iniciais de absorção. Num futuro trabalho seria importante também estudar o comportamento real de vários outros materiais absorventes sonoros, que à primeira vista poderão não sofrer tanto com a aplicação de tinta.

Outra abordagem importante de estudar seria o impacto de diferentes tipos de tinta (ou número de demãos) e até outros métodos de mudar a aparência estética do material absorvente sonoro. Nos testes realizados no decorrer deste trabalho foi utilizado sempre o mesmo tipo e tinta com o mesmo número de camadas aplicadas, seria benéfico um estudo mais detalhado sobre o efeito da variação da espessura da tinta aplicada e o método de aplicação (ex: rolo *vs spray*) bem como uma variação do material usado para cobrir a superfície da amostra (ex: uso de tecido).

Seria ainda útil, um estudo sobre a possibilidade de prever a perda de capacidade de absorção sonora da amostra através de modelos estatísticos e ou formulações matemáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, A. P. O. *Acústica ambiental e de edifícios*. Edição 8.14, FEUP, Porto, 2018.
- [2] Gaspar, A. C. R. *Estudos de Estratégias Não-Convencionais de Acústica Variável*. FCTUC, 2018.
- [3] Sousa, M. R. M. *Efeito do tamanho da amostra em ensaios laboratoriais de absorção sonora*, FEUP, 2016.
- [4] London, A. *The Determination of Reverberant Sound absorption coefficients from Acoustic Impedance Measurements*, *Journal of the Acoustical Society of America*, 1950, 22(2), (263-269).
- [5] Kinsler, L. E. *et al.*, *Fundamentals of Acoustics – 3rd Ed.*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1982.
- [6] Sacerdote, G. G. e Gigli, A., *Absorption of Sound by Resonant Panels*, *Journal of the Acoustical Society of America*, 1951.
- [7] Beranek, L. L., *Acoustics*, McGraw-Hill, Nova Iorque, 1954.
- [8] Silva, P. M., *Acústica de Edifícios*, LNEC, Lisboa, 1978.
- [9] Silva, P. M., *Condicionamento Acústico de Edifícios – Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros*, LNEC, Lisboa, 1984.
- [10] Reis, A., *Revestimentos de pisos em aglomerado de cortiça*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011.
- [11] *Processo de transformação*, <https://www.apcor.pt/cortica/processo-de-transformacao/percurso-industrial/aglomerados-compostos/>, acessado em Maio de 2019.
- [12] Mateus, C. *Desenvolvimento de solução combinada de aglomerados com cortiça para subcamadas de revestimento e de lajeta com comportamento acústico otimizado*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, 2015.
- [13] Chrisler, V. L. *Effect of paint on the sound absorption of acoustic materials*, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 24, Maio 1940.
- [14] NP EN ISO 354: 2007, *Acústica. Medição da absorção sonora em câmara reverberante*.