

# **EFEITO DO TAMANHO DA AMOSTRA EM ENSAIOS LABORATORIAIS DE ABSORÇÃO SONORA**

**Mário Rogério Machado Sousa**

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

JANEIRO DE 2016



## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto: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](mailto: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 - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016*.

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**

A presente dissertação é o somatório de um semestre, mas principalmente, de um percurso académico. O sucesso deste mesmo é o resultado do meu esforço, empenho e dedicação, que sem um apoio familiar e académico que tive, acredito que este percurso teria sido praticamente impossível. Posto isto, gostaria de agradecer a quem nestes últimos anos me apoiou nesta caminhada.

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais a oportunidade que me deram de ingressar no ensino superior e por estarem sempre do meu lado, tanto na vida académica como vida pessoal, demonstrando um interesse muito grande no meu sucesso.

À minha namorada, por me obrigar a estudar quando queria passear, por me fazer rir quando não havia motivos para isso, por estar do meu lado desde o início desta caminhada académica.

Ao meu orientador, Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, que foi persistente e incansável durante todo o semestre, estando sempre disponível e interessado no melhor caminho a seguir. Sem dúvida que não podia ter escolhido melhor orientador. Isto de trabalhar com o melhor dos melhores na Acústica é uma grande honra para mim, ter trabalhado com o Professor.

Ao Engenheiro A. Eduardo Costa, por me ajudar na parte prática do trabalho. Agradeço toda a paciência e disponibilidade que sempre demonstrou durante os ensaios laboratoriais. Demonstrou ser uma excelente pessoa, sempre de sorriso fácil, tornando o trabalho mais agradável de ser executado.



## **RESUMO**

O presente trabalho foca uma pequena parte da Acústica, tendo como centro os fenômenos de absorção sonora. Para a parametrização do coeficiente de absorção sonora é necessário a realização de um ensaio que obtenha uma informação normalizada e em conformidade com todos os materiais surgindo então a norma ISO 354 que regula a medição da absorção sonora em câmara reverberante. Como requisitos mínimos para a realização da medição surge a área da amostra, sendo necessário  $10 \text{ m}^2$  a  $12 \text{ m}^2$  numa câmara reverberante com volume inferior a  $200 \text{ m}^3$ . No caso de o volume ser superior utiliza-se o fator multiplicativo  $(V/200)^{2/3}$ .

Por forma a avaliar o problema do tamanho da amostra utilizado no ensaio para determinação da absorção sonora, estudou-se o tamanho mínimo de amostra necessária para obtenção de valor aceitável da absorção sonora, uma vez que a área dos exemplares para estudo pode ser um entrave para quem quer testar o material.

Utilizou-se para o ensaio amostras com dois tipos de tamanhos,  $1 \text{ m}^2$  e  $2 \text{ m}^2$ , que se vão somando até  $12 \text{ m}^2$  ( $1$  em  $1 \text{ m}^2$ ) para obtenção da área mínima necessária para o ensaio de absorção sonora em câmara reverberante.

Aplicam-se as metodologias para determinação do coeficiente de absorção sonora do material fazendo variar inicialmente a área da amostra sem alterar a quantidade de difusores por forma a avaliar o efeito do tamanho na variação do parâmetro estudado. A variação das dimensões da amostra consiste em testar de  $1 \text{ m}^2$  a  $12 \text{ m}^2$  ( $1$  a  $1 \text{ m}^2$ ) e verificar a variação do coeficiente de absorção sonora para cada tipo de amostra. No seguimento do trabalho, também se analisou qual a influência que tinha a disposição da amostra, testando-se para  $10 \text{ m}^2$  dispostos no centro da câmara reverberante e espalhados pela sala. O objetivo do estudo da amostra espalhada pela câmara reverberante é determinar o efeito do aumento do perímetro da amostra no valor do coeficiente de absorção sonora.

De seguida procedeu-se à análise de resultados, concluindo sobre a variação do parâmetro  $\alpha$  em função do tamanho da amostra e da disposição.

Conclui-se que a área necessária de amostra é de  $4 \text{ m}^2$ , inferior a requerida pela norma ISO 354, podendo assim testar materiais que contenham uma área compreendida maior que  $4 \text{ m}^2$  para obtenção do parâmetro estudado. Quanto à disposição da amostra na sala, conclui-se que há um aumento do valor do coeficiente de absorção, quando se compara os resultados obtidos de amostras com a mesma área ( $10 \text{ m}^2$ ) e perímetros diferentes ( $13,90 \text{ m}$  e  $17,10 \text{ m}$ ), demonstrando a importância do efeito de borda no estudo do  $\alpha$ .

**Palavra-Chave:** Acústica, ISO 354, Absorção Sonora, Câmara Reverberante.



## **ABSTRACT**

This study focuses on a specific point of the Acoustic science, portraying as its main point, the absorption of sound.

In order to set the parameters for sound absorption, an experiment that leads to standardised results to all materials is needed in accordance resulting the standard ISO 354, that handles the absorption of sound in a reverberating chamber.

As minimum requirements for the measurement comes up the sample's surface area 10 to 12 sqm in a reverberating chamber with less than 200 cubic meters. In the presence of higher volumes a factor of  $(V/200)^{2/3}$  should be used.

To evaluate the sample's size issue on the experiment to determine the sound absorption coefficient, the minimum size sample needed has been analysed, bearing in mind that the quantity of material of occurrences is key for those who want to properly test the material.

Two different sizes of samples have been used in the experiment, 1 and 2sqm, adding up to a maximum of 12 sqm (every each 1 sqm), in order to reach the minimum necessary area for the sound absorption coefficient in a reverberating chamber.

Normalized methodologies to determine the material's sound absorption coefficient were applied, making the sample's area to vary but keeping the quantity of difuses so as to only evaluate the effect of sample size on the variation of the analysed parameter ( $\alpha$ ).

Sample's dimension variations consist in testing from 1 to 12 m<sup>2</sup> (every each 1 m<sup>2</sup>) and check the deviation on the sound absorption coefficient for each kind of sample.

The influence of the sample position on the floor has also been tested for the 10 sqm arranged on the center of the reverberating chamber and scattered around the room. It is main objective is to determine the effect of the perimeter increase of the sample in the sound absorption coefficient.

The results have been analysed, therefore concluding on the variation of parameter  $\alpha$  as a result of the sample's arrangement and size.

It was concluded that the minimum necessary sample area is 4 m<sup>2</sup>, less than the minimum required by the standard ISO 354, allowing tests on materials with a comprising area bigger than 4 m<sup>2</sup> to obtain the analysed parameter with reasonably accuracy.

With regard to the arrangement of the sample within the room, it was concluded that there is an increase in the sound absorption coefficient, valurs the sample is separated all over the room floor, proving the importance of the edge effect on the  $\alpha$  examination.

**Key Words:** Acoustic, ISO 354, Sound Absorption Reverberaction Room.



## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE QUADROS.....	xiii
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS .....	1
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES .....</b>	<b>3</b>
2.1. PROPRIEDADES BÁSICAS DO SOM .....	3
2.1.1. PRESSÃO .....	3
2.1.2. FREQUÊNCIA .....	5
2.1.3. TEMPO .....	7
2.2. ABSORÇÃO SONORA .....	7
2.2.1. GENERALIDADES .....	7
2.2.2. MATERIAIS ABSORVENTES SONOROS .....	8
2.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO .....	9
2.4. DIFUSÃO .....	10
<b>3. ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>13</b>
3.1. ABSORÇÃO SONORA .....	13
3.2. VARIABILIDADE DE RESULTADOS .....	14
3.2.1. DIFUSÃO .....	14
3.2.2. GEOMETRIA DA AMOSTRA .....	16
<b>4. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>23</b>
4.1. METODOLOGIA DE ENSAIO .....	23
4.1.1. DESCRIÇÃO .....	23
4.1.2. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA .....	26
4.2. AMOSTRA .....	27
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>25</b>
5.1. EFEITO DO TAMANHO DA AMOSTRA .....	25
5.1.1. AMOSTRAS.....	25

5.1.2. VARIABILIDADE DO $\alpha_s$ .....	39
5.1.3. VARIAÇÃO DE $\alpha_s$ POR BANDA DE FREQUÊNCIA .....	43
5.1.4. VARIAÇÃO DE $\alpha_w$ E NRC EM FUNÇÃO DO TIPO DE AMOSTRA .....	44
<b>5.2. ANÁLISE DO EFEITO DA DISPOSIÇÃO DA AMOSTRA NO ENSAIO EM CÂMARA</b>	
<b>REVERBERANTE</b> .....	46
<b>6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> .....	<b>49</b>
6.1. CONCLUSÃO .....	49
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	50
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>51</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Propagação do som .....	3
Fig. 2.2 – Pressão sonora ( $p$ ), intensidade sonora ( $I$ ) e níveis de pressão sonora ( $L_p$ ) .....	5
Fig. 2.3 – Representação na forma oscilograma (esquerda) e espectrograma (direita) de dois sons puros e do som complexo que esses originam por sobreposição .....	6
Fig. 2.4 – Definição do Tempo de Reverberação ( $T_{60}$ ) teórico (A) e obtido por extrapolação ( $T_{30}$ ) (B) .....	9
Fig. 2.5 – Exemplo de uma superfície difusora .....	10
Fig. 3.1 – Difusor de Schroeder .....	12
Fig. 3.2 – Tipos de difusores: difusores de suspensão (a) e difusores de contorno misturados (b) à escala 1:5 .....	13
Fig. 3.3 – Coeficientes de absorção máxima em função da relação área de superfície do difusor para os quatro tipos de difusores .....	13
Fig. 3.4 – Comparação dos resultados do cálculo do coeficiente de absorção sonora e sua incerteza expandida realizada de acordo com ambas (versão antiga, <i>old</i> , e versão nova, <i>new</i> ) as versões da norma ISO 9613-1 .....	15
Fig. 3.5 – Amostra circular com 1,62 m de perímetro (esquerda) (área de 8,22 m <sup>2</sup> ) .....	16
Fig. 3.6 – Amostra quadrada com 2,87 m por 2,87 m (direita) (área de 8,22 m <sup>2</sup> ) .....	16
Fig. 3.7 – Amostra retangular com 11,58 m de perímetro (esquerda) (área de 8,22 m <sup>2</sup> ) .....	16
Fig. 3.8 – Amostra retangular com grande comprimento 6,71 m por 1,22 m (direita) (área de 8,22 m <sup>2</sup> ) .....	16
Fig. 3.9 – Amostra espalhada constituída por 22 peças de 0,61 m por 0,61 m (área de 8,22 m <sup>2</sup> e perímetro de 53,68 m) .....	17
Fig. 3.10 – Amostra retangular longa com perímetro de 15,85 m (esquerda) (área de 8,22 m <sup>2</sup> e perímetro de 15,58 m) .....	17
Fig. 3.11 – Amostra constituída por 22 peças com dimensões de 0,61 m por 0,61 m cada (direita) (área de 8,22 m <sup>2</sup> e perímetro de 53,68 m) .....	17
Fig. 3.12 – Amostra com área de 6,70 m <sup>2</sup> e perímetro de 10,98 m (esquerda) .....	18
Fig. 3.13 – Amostra com área de 6,70 m <sup>2</sup> e perímetro de 9,42 m (direita) .....	18
Fig. 4.1 – Manta usada no estudo (8 m <sup>2</sup> ) .....	20
Fig. 4.2 – Manta usada no estudo (12 m <sup>2</sup> ) .....	24
Fig. 4.3 – Manta espalhada (S10 ESP) .....	24
Fig. 5.1 – Evolução dos valores do coeficiente de absorção para cada frequência de S1 (1 m <sup>2</sup> ), S2 (2 m <sup>2</sup> ) e S3 (3 m <sup>2</sup> ) .....	26
Fig. 5.2 - Evolução dos valores do coeficiente de absorção para cada frequência de S4 (4 m <sup>2</sup> ), S5 (5 m <sup>2</sup> ) e S6 (6 m <sup>2</sup> ) .....	28
Fig. 5.3 - Evolução dos valores do coeficiente de absorção para cada frequência de S7 (7 m <sup>2</sup> ), S8 (8 m <sup>2</sup> ) e S9 (9 m <sup>2</sup> ) .....	30

Fig. 5.4 – Evolução dos valores do coeficiente de absorção para cada frequência de S10 (10 m <sup>2</sup> ), S11 (11 m <sup>2</sup> ) e S12 (12 m <sup>2</sup> ) .....	31
Fig. 5.5 – Desvio padrão dos valores de $\alpha_s$ para as bandas de frequência de 1/3 de oitava. ....	33
Fig. 5.6 – Desvio padrão relativo a $\alpha_{12}$ dos valores de $\alpha_s$ para as bandas de frequência de 1/3 de oitava. ....	34
Fig. 5.7 – Desvio padrão dos valores de $\alpha_s$ para as bandas de frequência de 1/1 de oitava. ....	35
Fig. 5.8 – Desvio padrão relativo a $\alpha_{12}$ dos valores de $\alpha_s$ para as bandas de frequência de 1/1 de oitava. ....	35
Fig. 5.9 – Evolução dos valores do coeficiente de absorção para cada frequência de todos os tipos de amostra. ....	36
Fig. 5.10 – Evolução dos valores do coeficiente de absorção para frequências $\leq 800$ Hz de todos os tipos de amostra. ....	37
Fig. 5.11 – Evolução dos valores do coeficiente de absorção para frequências $> 800$ Hz de todos os tipos de amostra. ....	38
Fig. 5.12 – Variabilidade do $\alpha$ face ao valor de referência (S=12 m <sup>2</sup> ) para a banda de frequência de 250 Hz (1/3 oitava). ....	39
Fig. 5.13 – Variabilidade do $\alpha$ face ao valor de referência (S=12 m <sup>2</sup> ) para a banda de frequência de 500 Hz (1/3 oitava). ....	39
Fig. 5.14 – Variabilidade do $\alpha$ face ao valor de referência (S=12 m <sup>2</sup> ) para a banda de frequência de 1000 Hz (1/3 oitava). ....	40
Fig. 5.15 – Variabilidade do $\alpha$ face ao valor de referência (S=12 m <sup>2</sup> ) para a banda de frequência de 2000 Hz (1/3 oitava). ....	40
Fig. 5.16 – Variabilidade do $\alpha$ face ao valor de referência (S=12 m <sup>2</sup> ) para a banda de frequência de 4000 Hz (1/3 oitava). ....	41
Fig. 5.17 – Variabilidade do $\alpha$ face ao valor de referência (S=12 m <sup>2</sup> ) para as bandas de frequência de 250, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz (1/3 oitava). ....	41
Fig. 5.18 – Evolução dos valores de $\alpha_s$ para S4 e S12 em todas as frequências. ....	42
Fig. 5.19 – Evolução dos valores de $\alpha_s$ para S5 e S12 em todas as frequências. ....	43
Fig. 5.20 – Variação de $\alpha_s$ por banda de frequência, com o aumento da área da amostra (S <sub>i</sub> ).....	44
Fig. 5.21 – Variação de NRC e $\alpha_w$ em função da área da amostra.....	45
Fig. 5.22 - Evolução do coeficiente de absorção para cada frequência nos casos de S10 e S10 ESP.....	47
Fig. 5.23 – Variabilidade do $\alpha$ face ao valor de referência S10 (S=10 m <sup>2</sup> ).....	47

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Frequências nominais em 1/3 e 1/1 de oitava. ....	6
Quadro 2.2 – Valores de $T$ ideais (para as bandas de frequência 500-1k Hz) para diversos tipos de espaços .....	9
Quadro 4.1 – Área de absorção sonora equivalente máxima para câmaras com $V=200\text{ m}^3$ [25] e $R_1$ do Laboratório de Acústica da FEUP com um volume de $216\text{ m}^3$ .....	20
Quadro 4.2 – Áreas utilizadas nos ensaios e respetivas designações das amostras. ....	23
Quadro 5.1 – Área de absorção sonora equivalente total ( $A_T$ ) e coeficiente de absorção sonora ( $\alpha_s$ ) dos ensaios realizados a S1, S2 e S3 .....	25
Quadro 5.2 - Área de absorção sonora equivalente total ( $A_T$ ) e coeficiente de absorção sonora ( $\alpha_s$ ) dos ensaios realizados a S4, S5 e S6 .....	27
Quadro 5.3 - Área de absorção sonora equivalente total ( $A_T$ ) e coeficiente de absorção sonora ( $\alpha_s$ ) dos ensaios realizados a S7, S8 e S9.....	29
Quadro 5.4 - Área de absorção sonora equivalente total ( $A_T$ ) e coeficiente de absorção sonora ( $\alpha_s$ ) dos ensaios realizados a S10, S11 e S12.....	31
Quadro 5.5 - Coeficiente de absorção sonora para todas as amostras, em 1/3 de oitava .....	33
Quadro 5.6 - Desvio-padrão e desvio-padrão relativo a $\alpha_{12}$ dos valores do coeficiente de absorção sonora, em 1/3 de oitava. ....	33
Quadro 5.7 - Coeficiente de absorção sonora para todas as amostras, em 1/1 de oitava. ....	34
Quadro 5.8 - Desvio-padrão e desvio-padrão relativo a $\alpha_{12}$ dos valores do coeficiente de absorção sonora, em 1/1 de oitava. ....	34
Quadro 5.9 – Variação de $\alpha_w$ e NRC em função da área.....	45
Quadro 5.10 – Coeficiente de absorção sonora ( $\alpha_s$ ) do ensaio realizado a S10 e S10 ESP ( $S=10\text{ m}^2$ ).....	43
Quadro 5.11 – Variação dos parâmetros NRC e $\alpha_w$ para S10 e S10 ESP.....	48

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

A Acústica é uma ciência que se divide em vários ramos tais como acústica de edifícios, psicoacústica, e muitas outras. Assumindo cada vez mais relevância na sociedade e dia-a-dia das pessoas, a acústica é uma ciência a ter em conta na melhoria do conforto e qualidade de vida das pessoas.

A acústica de edifícios estuda dois grandes temas: isolamento sonoro e correção acústica. Estes dois temas são muito diferentes, porque o isolamento sonoro tem como objetivo isolar um espaço de ruídos provenientes do exterior ou isolar o espaço para não emitir sons para o exterior. Por outro lado, a correção acústica tem como objetivo tornar o espaço acusticamente melhorado, ou seja, por exemplo em salas de cinema é importante tornar o som mais “limpo”, com pouca reverberação, implicando um projeto acústico para não se absorver em demasia o som e ao mesmo tempo não ter uma reverberação muito elevada. Posto isto, esta tese foca o coeficiente de absorção sonora, que estando ligado aos dois temas, tem maior relevo na correção acústica.

O presente trabalho foca-se no coeficiente absorção sonora como um conceito base da acústica, sendo este um grande tema da acústica de edifícios. Estudou-se o comportamento da variação da área da amostra, na determinação do coeficiente de absorção sonora. Fez-se variar a área de 1 a 12 m<sup>2</sup>, variou-se a disposição da amostra para um dos tipos de área (10 m<sup>2</sup>) e verificou-se o comportamento da variabilidade do coeficiente de absorção sonora, tanto para a variação da área como para a disposição em planta.

Neste seguimento, utilizou-se a norma ISO 354 [1] para a realização dos ensaios laboratoriais, embora o objetivo do trabalho seja estudar qual a “área mínima” de amostra necessária para obtenção do coeficiente de absorção sonora com razoável credibilidade. É importante salientar que a norma restringe a área da amostra entre 10 a 12 m<sup>2</sup> em câmara reverberante com volume inferior a 200 m<sup>3</sup> ou então, sendo um volume superior, utiliza-se o fator multiplicativo de  $(V/200)^{2/3}$ , o que limita o ensaio uma vez que nem sempre se obtém tal dimensão da amostra.

Em suma, o presente trabalho pretende melhorar o desempenho e otimização do ensaio laboratorial do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante por forma a ser possível minimizar a área da amostra em determinadas condições.

## 1.2. ESTRUTURA DA TESE

A presente tese está organizada por seis capítulos, dos quais são abordados os seguintes temas:

- *Capítulo 1* – introdução da tese explicando qual a importância e os objetivos pretendidos e como a tese se encontra estruturada;
- *Capítulo 2* – noções gerais da acústica e conceitos;
- *Capítulo 3* – abordagem de estudos anteriores e abordagem ao ensaio laboratorial;
- *Capítulo 4* – descrição do ensaio laboratorial e avaliação experimental;
- *Capítulo 5* – apresentação dos resultados obtidos e respetiva discussão;
- *Capítulo 6* – apresentação de todas as conclusões do trabalho e possíveis considerações para desenvolvimentos futuros do tema.

## 2

## CONCEITOS E DEFINIÇÕES

## 2.1. PROPRIEDADES BÁSICAS DO SOM

## 2.1.1. PRESSÃO

A Acústica é um ramo da Física que estuda o som e/ou o ruído. Entende-se por *som* o que é agradável ou tem significado para o ouvinte, enquanto que o *ruído* é desagradável ou sem significado, ou seja, o que poderá ser entendido como *som* para alguns, para outros, pode ser um *ruído*.

O som necessita de um meio para se propagar, seja sólido, líquido ou gasoso. Quando o meio de transmissão é o ar, o som é provocado pela colisão das partículas do meio e juntamente com a variação de pressão que chega ao ouvido humano. A propagação sonora pode ser representada através de ondas sonoras com zonas de compressão e rarefação (Fig. 2.1). Como tal, o elemento relevante a ser medido é a pressão sonora tendo sempre como base a pressão atmosférica, que tem o valor aproximado de 101.400 pascal (Pa) [2].

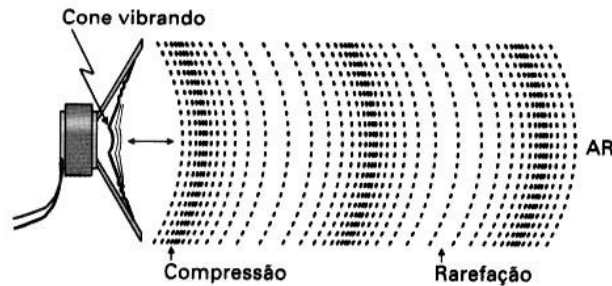


Fig. 2.1 – Propagação do som [2].

A lei de propagação das ondas de pressão sonora (num meio homogêneo, isotrópico, sem viscosidade e em repouso) pode ser deduzida, matematicamente, através da conjugação de três princípios: lei das transformações adiabáticas, segundo princípio fundamental da Mecânica e o princípio da continuidade obtendo-se a expressão (2.1) [3].

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

Onde  $c$  é a celeridade ou velocidade de propagação das ondas sonoras no ar que varia com a temperatura do ar,  $\theta$ , conforme a expressão (2.2), (válida para o ar seco e ao nível do mar):

$$c = 20,045\sqrt{T} \quad [\text{m/s}] \quad (2.2)$$

Em que,

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

Para analisar a propagação das ondas sonoras importa também analisar a intensidade sonora e a potência sonora.

A intensidade sonora ( $I$ ) é, numa dada direção, a quantidade média de energia que atravessa por segundo uma área de  $1 \text{ m}^2$ , normal a essa direção e quantifica-se em  $\text{W}/\text{m}^2$ . Esta grandeza é, portanto, uma grandeza vetorial e pode-se falar em campo de intensidade sonora como um campo vetorial [3].

A potência sonora ( $W$ ) é a característica da fonte e não do estímulo criado pela fonte num dado ponto ou direção como no caso da pressão e da intensidade. Ou seja, é a energia total que num segundo atravessa uma esfera fictícia de raio qualquer centrada na fonte e quantifica-se em  $\text{W}$  [3].

As três grandezas, pressão sonora, intensidade sonora e potência sonora estão relacionadas entre si matematicamente da seguinte forma:

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

Sendo,

- $I$  – intensidade sonora ( $\text{W}/\text{m}^2$ );
- $W$  – potência sonora ( $\text{W}$ );
- $r$  – distância (m);
- $p$  – pressão sonora (Pa);
- $\rho$  – massa volúmica (ar)  $\approx 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;
- $c$  – celeridade (m/s)  $\approx 340 \text{ m/s}$ .

Quanto à variação de pressão, o ser humano jovem com audição normal pode ouvir entre  $10^{-5} \text{ Pa}$  no limite mínimo e  $10^2 \text{ Pa}$  no limite máximo, denominando-se *limiar de audição* e *limiar da dor*, respetivamente. Assim, a gama de audibilidade humana no domínio da pressão situa-se em  $10^7$ . [3]

Uma vez que a escala linear em *pascal* conduz a valores de difícil uso prático, utilizam-se níveis de pressão sonora em que a unidade usada é o *decibel* (dB) (Fig. 2.2).

Note-se que o ouvido não responde de forma linear aos estímulos, mas de um modo quase logarítmico. Para tal, é necessário converter pressões sonoras em níveis de pressão sonora, tendo como valor da pressão de referência ( $p_0$ ) de  $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ , usando as expressões ((2.5) e (2.6), matematicamente iguais):

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [\text{dB}] \quad (2.5)$$

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} \quad [\text{dB}] \quad (2.6)$$

Estado	Intensidade Sonora ( $10^{-12} \text{ W/m}^2$ )	Nível Sonoro (dB)	Fontes Sonoras
<b>Nocivo</b>	100,000,000,000,000	140	Motor de reacção
	10,000,000,000,000	130	Fogos artificial
	1,000,000,000,000	120	Sala de máquinas de navios
<b>Limiar de dor</b>	100,000,000,000	110	Banda <i>rock</i>
	10,000,000,000	100	Martelo pneumático
	1,000,000,000	90	Veículo pesado
	100,000,000	80	Rua com muito tráfego
<b>Limiar de audição</b>	10,000,000	70	Automóvel particular
	1,000,000	60	Oficina
	100,000	50	
	10,000	40	
	1,000	30	
	100	20	
	10	10	
	1	0	<b>Limiar de audição</b>

Fig. 2.2 – Pressão sonora ( $p$ ), intensidade sonora ( $I$ ) e níveis de pressão sonora ( $L_p$ ) [2].

Aplicando a mesma conformidade, pode-se converter intensidade sonora ( $I$ ) em níveis de intensidade sonora ( $L_I$ ) através da expressão (2.7), tendo como intensidade sonora de referência ( $I_0$ ) igual a  $10^{-12} \text{ W/m}^2$  e converter igualmente potências sonoras ( $W$ ) em níveis de potência sonora ( $L_W$ ) (expressão (2.8)) utilizando como potência sonora de referência ( $W_0$ ) igual a  $10^{-12} \text{ W}$ .

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}] \quad (2.7)$$

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad [\text{dB}] \quad (2.8)$$

### 2.1.2. FREQUÊNCIA

Para uma caracterização de um sinal sonoro, é necessário estudar a sua frequência, pois esta diferencia o som (ou ruído) emitido por uma fonte sonora. A frequência ( $f$ ) caracteriza o número de ciclos completos por segundo de um som e tem como unidade de medida o *hertz* (Hz).

Importa caracterizar os sons entre os 20 e os 20.000 Hz, uma vez que a audição de um ser humano se restringe a este intervalo. Deste modo, os sons abaixo dos 20 Hz denominam-se *infra-sons* e acima dos 20.000 Hz designam-se por *ultra-sons*. Em Acústica de Edifícios distinguem-se três grandes zonas de frequências:

- Frequências graves: 20 a 355 Hz;
- Frequências médias: 355 a 1.410 Hz;
- Frequências agudas: 1.410 a 20.000 Hz.

O que diferencia um som puro de um complexo é a frequência, pois, um som puro apresenta uma única frequência e em contrapartida, o som complexo é o resultado da sobreposição de dois ou mais sons puros com várias frequências (Fig. 2.3).

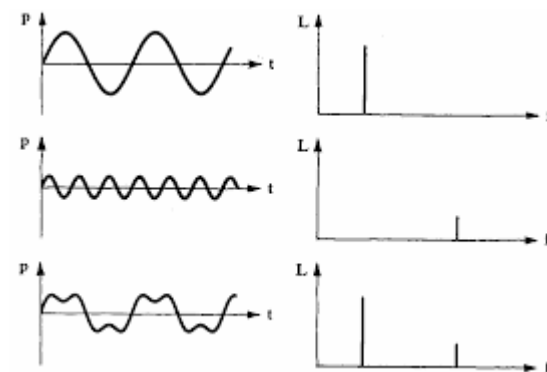


Fig. 2.3 – Representação na forma de oscilograma (esquerda) e de espectrograma (direita) de dois sons puros e do som complexo que esses originam por sobreposição [adaptado de 3].

Relativamente às bandas de 1/1 de oitava e de 1/3 de oitava, importa referir que a segunda permite uma análise mais detalhada, isto porque, e considerando a gama audível pelo ouvido humano, os intervalos de 1/1 de oitava normalizado estão centrados em: 16, 31, 125, 250, 500, 1k, 2k, 8k e 16k Hz, enquanto que para 1/3 de oitava os intervalos estão centrados em: 20, 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1k, 1.250, 1.600, 2k, 2.500, 3.150, 4k, 5k, 6.300, 8k, 10k, 12.500, 16k e 20k Hz (Quadro 2.1). [3]

Quadro 2.1 – Frequências nominais em 1/3 e 1/1 de oitava.

Ban da de freq.	Frequência nominal (Hz)															
	1/3 de oit.	25	31	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630
1/1 de oit.	31			63			125			250			500			
1/3 de oit.	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	10	12,5	16	20	
1/1 de oit.	1k			2k			4k			8k			16k			

### 2.1.3. TEMPO

O tempo é tido em conta na análise das ondas sonoras, pois existem sons de curta e longa duração, causando instabilidade temporal dos níveis de pressão sonora, tendo por isso que recorrer a parâmetros com intervenção do fator tempo. Os dois parâmetros de medida do ruído usados são os níveis de pressão sonora estatísticos ( $L_N$ ) e o nível de pressão sonora contínuo equivalente ( $L_{eq}$ ).

O nível de pressão sonora contínuo equivalente ( $L_{eq}$ ) é a média num intervalo de tempo de medição T e é dado pela expressão (2.9). [3]

$$L_{eq} = 10 \log \left( \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \left( t_i * 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.9)$$

O nível de pressão sonora estatísticos ( $L_N$ ) é o valor do nível que é excedido em N% do intervalo de tempo de medição. Os níveis de pressão sonora estatísticos mais usados são  $L_{50}$  e  $L_{95}$ .

## 2.2. ABSORÇÃO SONORA

### 2.2.1. GENERALIDADES

A absorção sonora caracteriza-se pela transformação de energia sonora que incide no material em outra energia qualquer que, geralmente, é térmica.

Por forma a caracterizar a absorção sonora, utiliza-se o *coeficiente de absorção sonora* ( $\alpha$ ) que corresponde ao quociente entre a quantidade de energia sonora que é absorvida e a energia que nele é incidente. O intervalo de valores para este coeficiente é entre 0 e 1, em que 0 é um material refletor, 1 para material altamente absorvente, ou seja, toda a energia incidente é absorvida pelo material. Dando como exemplo um material muito polido, a pedra mármore tem um coeficiente muito baixo, ao contrário de um material poroso como a cortiça que tem um coeficiente de absorção sonora mais elevado.

O coeficiente de absorção sonora não depende apenas do material, mas sim da qualidade do que nele incide e como incide. Trata-se da frequência e do ângulo de incidência com que o som é emitido e para isso, existem dois métodos para obter o coeficiente de absorção sonora que são, o tubo de ondas estacionárias e o método da câmara reverberante.

O tubo de ondas estacionárias consiste num longo tubo metálico (0,10 m de diâmetro) onde, numa extremidade, é colocada a amostra em estudo (circular com 5 cm de raio) e, na outra extremidade, existe um pequeno altifalante com um orifício, perfurado no meio do seu magneto, para fazer passar uma pequena vareta metálica ligada a um microfone que desliza sobre rodas num recipiente. Ligando o altifalante este cria ondas estacionárias devidas à interação da onda incidente com a onda refletida na amostra. Este mecanismo é descrito pela norma ISO 10534-1 [4], na qual se obtém o coeficiente de absorção através da expressão (2.10) [3].

$$\alpha = 1 - [(SWR - 1)/(SWR + 1)]^2 \quad (2.10)$$

Onde  $SWR$  (*standing wave ratio*) é calculado através da expressão (2.11).

$$SWR = \frac{|P_{\text{máx}}|}{|P_{\text{mín}}|} \quad (2.11)$$

Este método de ensaio apenas se refere unicamente a uma incidência perpendicular de ondas sonoras, o que o torna pouco adequado visto que as ondas podem ter variados ângulos de incidência e podem ser caracterizados melhor em câmara reverberante onde a amostra é atingida praticamente na totalidade por diversos ângulos de incidência.

O método da câmara reverberante consiste em colocar uma amostra normalizada, entre 10 a 12 m<sup>2</sup>, no pavimento da sala, e através da comparação dos tempos de reverberação com a câmara vazia e com a amostra, obtêm-se os coeficientes de absorção da amostra ( $\alpha_s$ ). Este processo é descrito pela norma NP EN ISO 354 [1] e os resultados são mais próximos da realidade uma vez que no método da câmara reverberante o campo sonoro é difuso.

Quando se trata de absorção sonora, surgem dois parâmetros a ela associada, que são:

- NRC (*noise reduction coefficient*);
- $\alpha_w$ .

O NRC define-se (cf. norma ASTM C423 [22]) como a média aritmética dos valores de  $\alpha$  nas bandas de oitava dos 250 aos 2000 Hz (e apresenta-se arredondado para o múltiplo mais próximo de 0,05) [3].

No que diz respeito ao parâmetro  $\alpha_w$ , é obtido (cf. norma EN ISO 11654 [31]) pelo ajuste ponderado duma curva de referência usando as bandas de oitava 250 aos 4000 Hz.

A norma EN ISO 11654 [31] também refere a atribuição de classes de absorção sonora [3]:

- 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 -  $0,15 \leq \alpha_w \leq 0,25$ ;
- Não classificado -  $\alpha_w \leq 0,10$ .

### 2.2.2. MATERIAIS ABSORVENTES SONOROS

Por forma a reunir em categorias os diferentes tipos de materiais e sistemas absorventes com uma maior eficácia, agruparam-se os materiais por gamas de frequência da sua maior eficácia. Como tal, estão agrupados da seguinte forma:

- *Materiais porosos ou fibrosos*;
- *Ressoadores*;
- *Membranas*.

No que diz respeito aos *materiais porosos e fibrosos* são característicos por “absorverem mais” nas altas frequências, quanto aos *ressoadores de cavidade* ou *ressoadores de Helmholtz* são sistemas com maior eficiência de absorção sonora nas frequências médias por só apresentarem uma pequena cavidade de abertura. Por fim, as *membranas* são sistemas com maior absorção sonora nas frequências baixas, característicos por absorverem o som devido a vibração da estrutura e também devido às perdas de calor por fricção nas suas fibras quando o material entra em flexão.

### 2.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Num espaço amplo, onde não existem quaisquer superfícies refletoras, a energia sonora que chega ao recetor é apenas resultante da transmissão direta. Como na realidade não se está nessa situação, o som que chega ao recetor é proveniente de transmissão direta e indireta (refletida) simultaneamente. Com isto, verifica-se que a transmissão direta atinge primeiro o recetor, seguida pelas ondas refletidas, que demoram tanto mais tempo quanto maior for o número de reflexões.

Define-se como tempo de reverberação ( $T$ ) o intervalo de tempo (em segundos) necessário, numa dada banda de frequências, para que o nível de pressão sonora e após interrompida a emissão de energia por parte da fonte sonora, decresça 60 dB (Fig. 2.4) ou, do ponto de vista energético, para que a densidade média de energia sonora atinja um milionésimo do seu valor inicial [5].

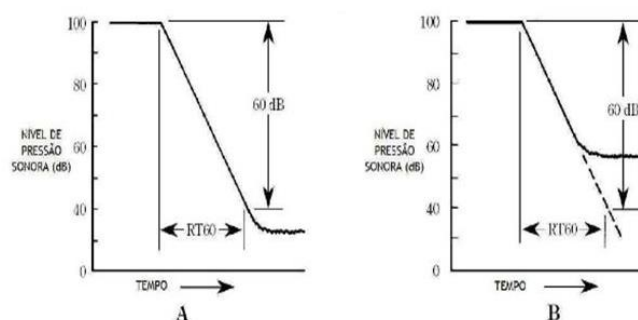


Fig. 2.4 – Definição do Tempo de Reverberação ( $T_{60}$ ) teórico (A) e obtido por extrapolação ( $T_{30}$ ) (B) [3]

O tempo de reverberação em espaços fechados tem efeitos contrários, em que por um lado aumenta o nível sonoro, mas por outro mascara os sons diretos devido à presença de som refletido, dificultando, por exemplo, a inteligibilidade da palavra. Ou seja, é necessário desenhar/dimensionar os espaços de acordo com a sua importância quanto ao tempo de reverberação ideal. No quadro 2.2 exemplificam-se alguns espaços e respetivos tempos de reverberações ideais em função do propósito para qual foram concebidos.

Quadro 2.2 – Valores de  $T$  ideais (para as bandas de frequência 500-1k Hz) para diversos tipos de espaços [adaptado 3]

Função do espaço	$T$ (s)
Auditório (palavra)	0,7 – 0,8
Teatro	0,7 – 0,9
Música de órgão	2,5 – 3,5
Estúdio de gravação	0,4 – 0,6

Num espaço com tempo de reverberação baixo e outro espaço com um tempo de reverberação elevado podem ser os dois acusticamente bons, pois o que define se são bons ou não, é sua função.

Há diversas fórmulas para determinar o tempo de reverberação, mas a mais utilizada é a *fórmula de Sabine* e define-se pela expressão (2.12).

$$T = \frac{0,16V}{A} = \frac{0,16V}{\sum_{i=1}^N \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^M A_j + mV} \quad [\text{s}] \quad (2.12)$$

Em que,

- $T$  – tempo de reverberação (s);
- $V$  – Volume do compartimento ( $\text{m}^3$ );
- $\alpha_i$  – Coeficiente de absorção sonora;
- $A$  – Absorção sonora total do espaço ( $\text{m}^2$ );
- $S_i$  – superfície real do material ( $\text{m}^2$ );
- $A_j$  – absorções sonoras localizadas ( $\text{m}^2$ );
- $m$  – coeficiente de absorção sonora do ar ( $\text{m}^{-1}$ ) em função da humidade relativa.

## 2.4. DIFUSÃO

Uma superfície com capacidade para refletir em todas as direções designa-se por superfície difusora (Fig. 2.5). Uma vez que as ondas sonoras apresentam diferentes frequências (consequentes comprimentos de onda diferentes), as superfícies tem de ser dimensionadas de acordo com a sua utilização. Ou seja, para frequências baixas, relevo de grandes dimensões dos difusores, para altas frequências, superfícies com relevo de pequenas dimensões.

Os materiais de difusão têm vários objetivos, tais como, prevenir defeitos acústicos como ecos ou zonas de sombra, manter a acústica do espaço viva, espalhar o som pelo espaço e aumentar a intimidade sonora do ouvinte.

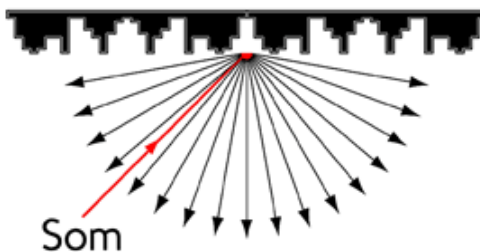


Fig. 2.5 – Exemplo de uma superfície difusora [6].

# 3

## ESTADO DA ARTE

### 3.1. ABSORÇÃO SONORA

Hoje em dia, a área da Acústica está presente em quase tudo aquilo que nos rodeia e as pessoas já usam os seus conceitos e utilizam-nos na construção dos seus próprios espaços. Porém, as soluções e os materiais usados para melhorar um espaço acusticamente tem um custo associado e além disso a colocação de um só material, por vezes, não é suficiente para a resolução do problema, sabendo que cada espaço é dimensionado conforme o tipo de utilização.

Para um melhor entendimento do conceito estudado, absorção sonora, interessa mencionar a sua origem e fundamento. Depois dos trabalhos realizados pelo “fundador da acústica de edifícios”, W. C. Sabine, entre os séc. XIX e XX, os primeiros estudos sobre absorção sonora foram realizados por Morse *et al.* [7] em 1940, onde relacionavam a absorção sonora e a impedância acústica e o modo da sua determinação.

Após sete anos, em 1947, surge um estudo sobre painéis perfurados para absorção sonora, funcionando como ressoadores, realizado por Bolt [8], mostrando que, mantendo a taxa de perfuração e ao mesmo tempo aumentando a dimensão das perfurações, a frequência de pico diminui. Posteriormente, mudando a taxa de perfuração para furos com a mesma dimensão, conclui que a frequência do sistema aumenta.

London descreve, em 1950 [9], um processo de determinação do coeficiente de absorção sonora para uma incidência difusa a partir do coeficiente de absorção sonora para incidência normal.

No mesmo ano, e com um grande contributo para a acústica, surge Kinsler [10] que desenvolveu um estudo sobre a propagação do sonora, não só de uma forma matemática, mas também estabelecendo algumas relações básicas em termos de absorção sonora e impedância acústica.

No ano seguinte, em 1951, Sacerdote *et al.* [11] mede o coeficiente de absorção sonora e a frequência de ressonância em sistemas em incidência normal e aleatória e compara os valores medidos com resultados obtidos pelas fórmulas de previsão, sendo que algumas têm em consideração o ângulo de incidência das ondas. Continuando em 1951, Ingard e Bolt [12] analisam o comportamento da introdução de uma caixa-de-ar numa parede rígida, podendo o referido material estar protegido por um painel perfurado. Em 1954, Beranek [13] apresenta um trabalho, mais no apoio ao ensino, da sintetização dos conceitos básicos bem como uma revisão do conhecimento no âmbito da absorção sonora.

Anos mais tarde, em 1978, surge uma das primeiras obras nacionais sobre o assunto, transportando para território nacional muito conhecimento existente, conjugando-o com os seus próprios conhecimentos sobre absorção sonora [14]. Trata-se de Silva, que em 1984 [15] aprofunda o seu trabalho sobre materiais e sistemas absorventes criando algumas análises

experimentais aos vários tipos de sistemas. Dois anos mais tarde, Meisser [16], estuda alguns sistemas de absorção frequência de ressonância e também a absorção sonora.

Em 2004, Cox e D'António [17] apresentam um trabalho vasto sobre sistemas absorventes, indicando o efeito da variação da taxa de perfuração na absorção sonora. No ano seguinte, Domingues [18] compila, para Portugal, coeficientes de absorção sonora para os materiais de construção mais correntes, no âmbito do estudo de sistemas absorventes sonoros.

Após uma breve compilação de estudos importantes sobre a absorção sonora, importa focar na temática tratada. Coloca-se a questão da variabilidade dos resultados do ensaio, ou seja, quais os fatores que fazem variar os valores do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante. Surgem então os elementos que fazem parte do estudo da variabilidade dos valores do coeficiente de absorção sonora que são o maior ou menor grau de difusibilidade da câmara reverberante e a geometria da amostra; para além de outros não retratados neste trabalho como a temperatura e humidade relativa do ar ambiente, por exemplo.

### 3.2. VARIABILIDADE DOS RESULTADOS

#### 3.2.1. DIFUSÃO

O estudo de fenómenos de difusão é relativamente recente, recuando até ao ano de 1979, Manfred Schroeder [19], realiza um estudo pioneiro contribuindo para a melhor compreensão do fenómeno da capacidade de modelar e dimensionar superfícies difusoras com propriedades e comportamentos conhecidos. Schroeder criou superfícies difusoras com alteração de fase das ondas sonoras (*phase grating diffuser*, conhecido como difusor de Schroeder – Fig. 3.1).

Este difusor é caracterizado por alterar a fase das ondas sonoras, provocando difusão sonora. Este fenómeno é conseguido através de reentrâncias de largura idêntica, mas profundidades diferentes. Como tal, diferentes combinações geométricas destas reentrâncias levam a comportamentos difusores diferenciados.

Devido às potencialidades deste difusor, baseado em simples formulações matemáticas, satisfazem de forma perfeita os engenheiros acústicos que dispõem de uma ferramenta com superfície difusora de comportamento acústico conhecido.

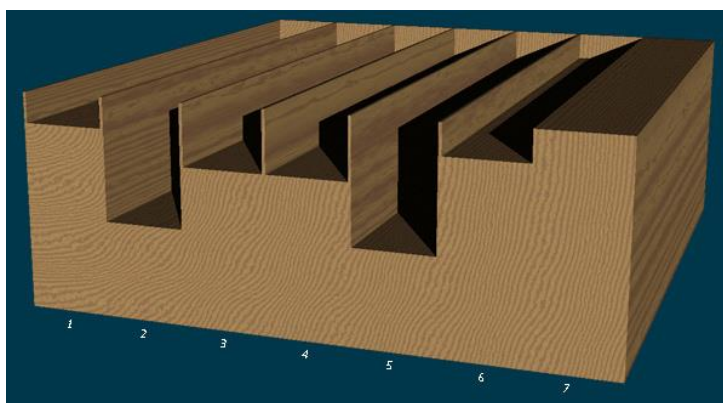


Fig. 3.1 – Difusor de Schroeder [20].

O campo difuso é criado devido à utilização de superfícies refletoras colocadas no teto ou paredes da câmara reverberante que tornam o espaço acusticamente mais perfeito, no que diz respeito à

difusibilidade. Posto isto, colocam-se várias questões: Quantos difusores são necessários? Qual o modo de colocação? Onde devem ser colocados?

Recentemente, Bradley [21], em 2014 estudou o efeito de difusores de contorno numa câmara reverberante, com quantificadores padronizados de campos difusos. O autor utilizou nos ensaios difusores de fronteira em forma de tampas hemisféricas de madeira revestidas com verniz refletor de som. De forma a facilitar o ensaio, Bradley utilizou uma câmara reverberante à escala 1:5 e formatou todo o resto à escala. Criou quatro tipos de difusores para análise, em suspensão, contorno pequeno, grande contorno e fronteira mista (Fig. 3.2).

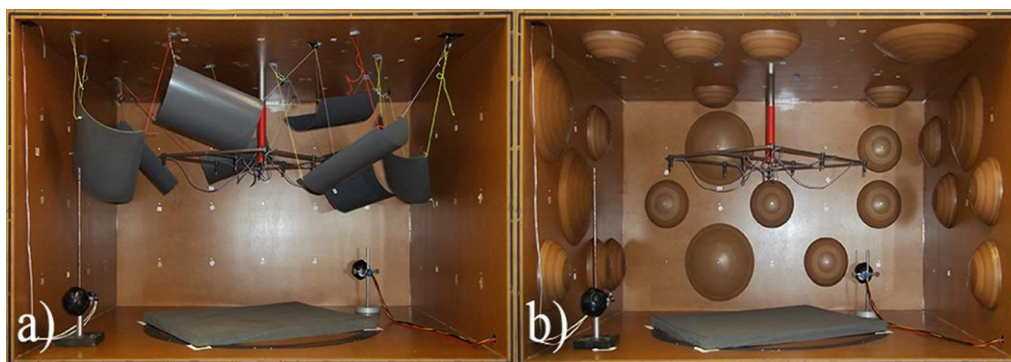


Fig. 3.2 – Tipos de difusores: difusores de suspensão (a) e difusores de contorno misturados (b) à escala 1:5 [21].

Para o estudo da influência do número de difusores no coeficiente de absorção sonora máxima, calculado de acordo com a norma ASTM-C423 [22] ou ISO 354 [1], esse autor foi adicionando difusores e examinando o comportamento do  $\alpha_{max}$ . A Fig. 3.3 ilustra o comportamento em função de cada tipo de difusor.

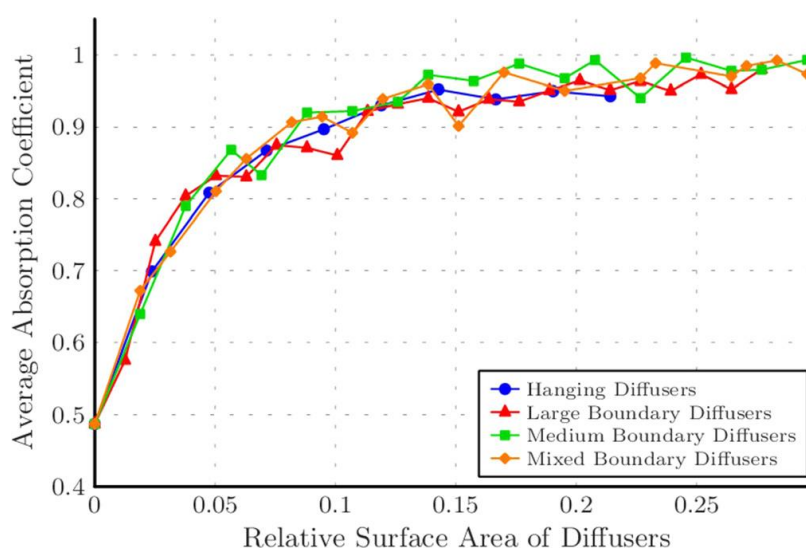


Fig. 3.3 – Valores do coeficiente de absorção máxima em função da relação área de superfície do difusor para os quatro tipos de difusores [21].

Analisando os dados da Fig. 3.3, conclui-se que há uma estabilização da absorção máxima com o aumento da quantidade de difusores, embora se note que não tende para uma continuidade do

valor. Note-se também que cada tipo de difusor produz um valor do coeficiente de absorção diferente. Com estes resultados, o autor não encontra uma resposta definitiva para o problema, ou seja, não há um tipo de difusores ideal. Apenas conclui que os difusores de fronteira podem ser uma alternativa adequada para difusores de suspensão.

### 3.2.2. GEOMETRIA DA AMOSTRA

Numa abordagem histórica de trabalhos que se debruçam sobre o efeito da geometria da amostra na câmara reverberante, no coeficiente de absorção sonora, tem-se que recuar até 1981, com o trabalho intitulado *efeito da geometria no coeficiente de absorção sonora aparente medido em câmara reverberante* [23]. No seguimento do trabalho, o autor procura responder a algumas questões que considera pertinentes nomeadamente: Quão linear é a relação entre  $\alpha$  e  $E$  (rácio do perímetro para a área de amostra)? Pode uma extrapolação ser efetuada ao valor de  $E=0$ , correspondendo a uma área de amostra infinito? Como depende a absorção sonora da forma da amostra? Como pode ser prevista teoricamente a absorção sonora de uma amostra?

Por forma a responder às questões colocadas, o Bartel utilizou a norma americana ANSI/ASTM C 423-77 [24] e para determinar o efeito das variações da área da amostra e perímetro, no coeficiente de absorção sonora, as medições foram feitas com a área da amostra mantida constante, mas fazendo variar a distribuição do material no piso da câmara reverberante para obtenção de diferentes perímetros. Usou uma área da amostra de  $8,8 \text{ m}^2$  e os coeficientes de absorção sonora foram medidos para oito arranjos diferentes, em que o perímetro das medições variavam nos seguintes valores: 12,1; 14,5; 16,9; 19,4; 21,8; 24,2; 26,6 e 29,0 m. Os resultados experimentais foram comparados com um modelo teórico, Northwood [25], utilizando os valores da “admitância acústica” obtidos a partir de medições do tubo de impedância realizados sobre os mesmos materiais. Ambos os resultados experimentais e teóricos indicam que o coeficiente de absorção sonora aumenta linearmente com o  $E$ , variando entre 1,3 a  $3,3 \text{ m}^{-1}$ . Quanto à forma da amostra, o autor testa a absorção sonora com as bordas cobertas e descobertas de material refletor e conclui que o  $\alpha$  pode variar mais de 10% para materiais anisotrópicos de 5 cm ou mais de espessura. Para uma área da amostra e perímetro constantes (neste caso  $8,8 \text{ m}^2$  e 16,9 m, respetivamente), o valor de  $\alpha$  diminui à medida que o número de lados descobertos aumenta. A mudança de  $\alpha$  é da ordem de 2% a 3% com o número de cantos, que neste caso variava de 4 a 12. O autor também conclui que comparando os resultados com uma análise teórica por Northwood [25], os valores do coeficiente de absorção sonora são muito idênticos, com um desfasamento de +/- 15%. Com esta análise de Northwood verifica que para relações lineares entre  $\alpha$  e  $E$ , não podem em geral ser extrapolados os valores de  $E=0$  na obtenção de coeficientes de absorção sonora com áreas muito grandes de amostra.

Anos mais tarde, em 2001, surgem Kimura e Kohei [26], com um estudo da influência do tamanho da amostra na medição do coeficiente de absorção sonora de incidência oblíqua. Utilizou como materiais de teste: fibra de vidro com espessura de 50 e 100 mm, como materiais altamente absorventes e cerâmica com uma espessura de 52 mm, como material de absorção relativamente baixa. As áreas de superfície testadas variam entre 0,0625 e  $45 \text{ m}^2$  para as fibras de vidro e de 0,1563 a  $39,168 \text{ m}^2$  para a cerâmica. O autor conclui que acima de  $20 \text{ m}^2$ , os coeficientes de absorção de incidência oblíqua médios são 0,83, 0,97 e 0,74 para fibra de vidro 50 e 100 mm de espessura, e de cerâmica de 52 mm de espessura, respetivamente. Embora permita que, para uma tolerância de 0,01 nos coeficientes de absorção sonora, pode-se selecionar a área de superfície de  $6,0 \text{ m}^2$  para a fibra de vidro de 50 mm de espessura,  $8,75 \text{ m}^2$  para a fibra de vidro de 100 mm e  $9,68 \text{ m}^2$  para as cerâmicas de espessura 52 mm. No entanto, deve-se prestar atenção à componente da frequência na incidência oblíqua do coeficiente de absorção, e como tal, o autor conclui que a área necessária mínima é de  $16 \text{ m}^2$  com uma proporção de comprimento para largura de 1,25.

Decorria o ano 2008, quando Izewska [27] publicou um estudo sobre a incerteza da medição do coeficiente de absorção sonora. A avaliação da incerteza é muito importante porque atesta a qualidade das medições. No caso de medições do coeficiente de absorção sonora, levada a cabo de acordo com a norma EN ISO 354 [1], a incerteza global é influenciada pelos tempos de reverberação ( $T_1$  e  $T_2$ ) e os coeficientes de atenuação de energias ( $M_1$  e  $M_2$ ), calculado de acordo com a norma ISO 9613-1 (absorção do som pela atmosfera) [28] e representando as condições climáticas da sala de reverberação. Apesar das diferenças entre  $M_1$  e  $M_2$  serem diminutas, representam a mudança de condições climáticas, em que a forma exponencial dos coeficientes da função provocados na incerteza dos resultados das medições, com a frequência aumenta muito rápido (Fig. 3.4).

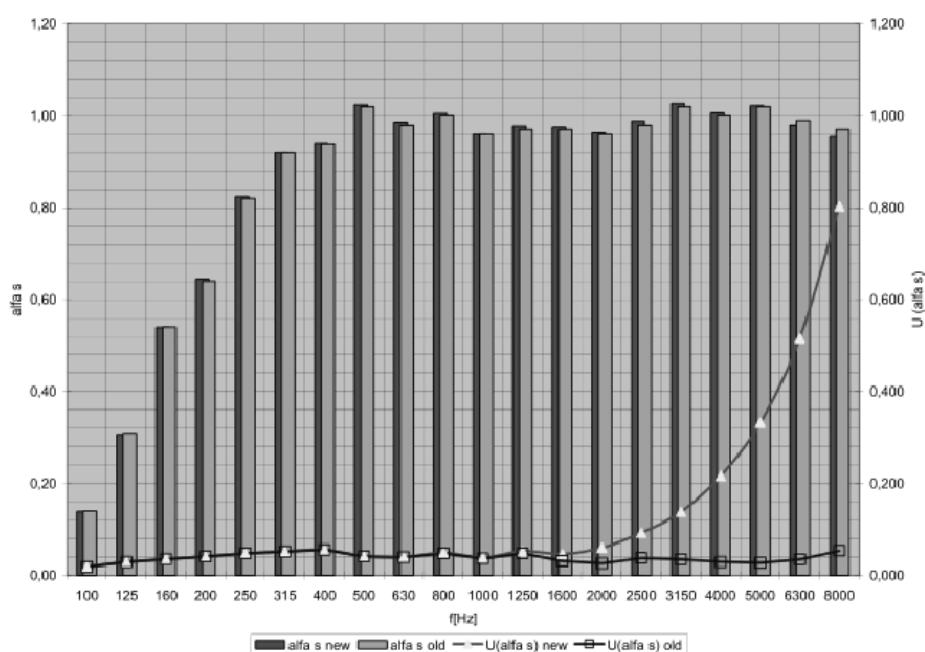


Fig. 3.4 – Comparação dos resultados do cálculo do coeficiente de absorção sonora e sua incerteza expandida realizada de acordo com ambas as versões da norma ISO 9613-1. (versão antiga, *old*, e versão nova, *new*) [27].

No ano seguinte, Sauro *et al.* [29], realiza um trabalho dividido em duas partes, sendo na primeira o tema de trabalho “*é a área quadrada suficiente?*” e na segunda estuda o efeito de borda questionando “*é o efeito de borda mais importante do que o esperado?*”. Perante as diferenças existentes entre os “coeficientes de absorção” medidos com as normas ASTM-C423 [22], ISO-354 [1] e ISO-17497-1 [30], num material comum, o autor interroga quais os parâmetros que levam a esta disparidade de resultados, concluindo que o efeito de borda estaria na causa de tal facto. Posto isto, o autor define a forma e o tamanho da amostra relativa a cada norma, devendo ser cumpridos com os seguintes requisitos:

- ASTM-C423 [22] – Requer uma amostra retangular com um tamanho de 6,69 m<sup>2</sup>. As dimensões devem ter um comprimento de 2,74 m e uma largura de 2,44 m. O padrão criado foi de 5,95 m<sup>2</sup>, com um comprimento e largura de 2,44 m.
- ISO 354 [1] – Requer uma amostra retangular com um tamanho de 10 a 12 m<sup>2</sup>, em que a amostra tenha uma razão largura/comprimento de 0,7 a 1,0.

- ISO 17497-1 [30] – Requer uma amostra circular com uma área mínima de 7,068 m<sup>2</sup>. As dimensões da amostra devem ter um diâmetro mínimo de 3 metros.

O método de ensaio escolhido foi o da ASTM-C423 usando “ruído interrompido”, para uma série de amostras de fibra de vidro com área comum de 8,22 m<sup>2</sup> e perímetros variáveis. Também testou uma madeira HDF com as mesmas dimensões. Apresentam-se nas Fig. 3.5 até 3.9 as imagens ilustrativas dos materiais e formas para teste na obtenção do coeficiente de absorção.

Numa primeira fase mantém-se a área e varia o perímetro (Fig. 3.5 até Fig. 3.9), em seguida inverte-se o estudo, ou seja, mantém-se o perímetro e varia a área.



Fig. 3.5 – Amostra circular com 1,62 m de perímetro (esquerda) (área de 8,22 m<sup>2</sup>) [29].

Fig. 3.6 – Amostra quadrada com 2,87 m por 2,87 m (direita) (área de 8,22 m<sup>2</sup>) [29].



Fig. 3.7 – Amostra retangular com 11,58 m de perímetro (esquerda) (área de 8,22 m<sup>2</sup>) [29].

Fig. 3.8 – Amostra retangular com grande comprimento 6,71 m por 1,22 m (direita) (área de 8,22 m<sup>2</sup>) [29].



Fig. 3.9 – Amostra espalhada constituída por 22 peças de 0,61 m por 0,61 m (área de 8,22 m<sup>2</sup> e perímetro de 53,68 m) [29].

O autor também estudou o efeito da amostra com área comum e material não absorvente (Fig. 3.10 e 3.11). A amostra é constituída de madeira HDF com espessura de 2,54 cm selada com verniz marinho. Para verificar o comportamento da alteração do coeficiente de absorção, o autor testou também a amostra com área igual (8,22 m<sup>2</sup>) e perímetro diferentes (15,58 m e 53,68 m), com 5,08 cm de espessura ao invés de 2,54 cm como tinha feito até então (Fig. 3.12 e Fig. 3.13).



Fig. 3.10 – Amostra retangular longa com perímetro de 15,85 m (esquerda) (área de 8,22 m<sup>2</sup> e perímetro de 15,58 m) [29].

Fig. 3.11 – Amostra constituída por 22 peças com dimensões de 0,61 m por 0,61 m cada (direita) (área de 8,22 m<sup>2</sup> e perímetro de 53,68 m) [29].

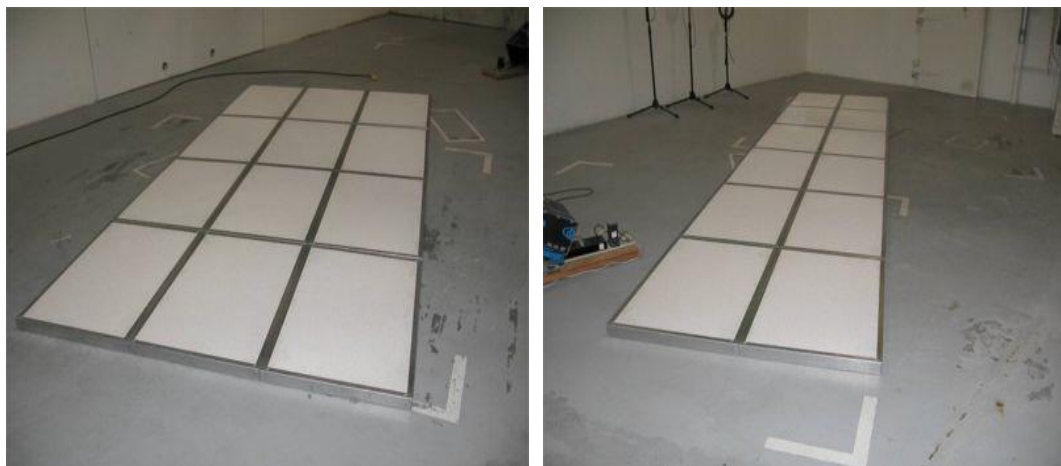


Fig. 3.12 – Amostra com área de 6,70 m<sup>2</sup> e perímetro de 10,98 m (esquerda) [29].

Fig. 13 – Amostra com área de 6,70 m<sup>2</sup> e perímetro de 9,42 m (direita) [29].

Após a preparação das amostras e efetuados os ensaios, com base na norma ASTM-C423 [22], o autor dividiu a análise para cada tipo de comparação. Numa primeira análise compara o efeito do perímetro no coeficiente de absorção sonora, concluindo que, à medida que a proporção de perímetro em relação a área aumenta, a absorção também aumenta em faixas de frequência específicas. Este facto é explicado pelo autor, observando que a espessura do material determina a gama de frequências onde os efeitos são mais observados. De seguida observou o comportamento do coeficiente de absorção sonora à variação da área e verificou que a absorção aumenta com o aumento substancial da área e particularmente com a proporção de perímetro em relação a área, sendo que este aumento se verifica igualmente na mesma faixa de frequências que no primeiro ensaio. Com isto conclui que o efeito de borda tem maior influência que a área da superfície. Após estes ensaios, foi feito um ensaio similar com o dobro da espessura, concluindo que a gama de frequências onde aumenta é mais baixa que nas outras, ou seja, com o dobro da espessura o ganho começa nos 200 Hz ao contrário do primeiro ensaio que começa nos 400 Hz. Assim, uma duplicação da espessura reduz a frequência de partida de um factor de 0,5.

É importante salientar que os autores e trabalhos aqui citados são apenas os que mais relevância têm para esta temática. Com isto pretende-se ter uma maior perceção dos resultados esperados neste trabalho e um conhecimento mais aprofundado na temática estudada.

# 4

## AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

### 4.1. METODOLOGIA DE ENSAIO

#### 4.1.1. DESCRIÇÃO

As medições da absorção sonora foram realizadas em câmara reverberante e orientam-se segundo a norma NP EN ISO 354 [1] na qual são medidos os tempos de reverberação com e sem amostra e, através da comparação desses resultados, calcula-se a área de absorção equivalente da amostra, usando a fórmula de Sabine.

A câmara onde se realizaram os ensaios foi a câmara reverberante R1 do Laboratório de Acústica da FEUP, que tem comprimento médio 7,46 m, largura média de 5,87 m e um volume de aproximadamente 216 m<sup>3</sup>. A gama de frequências de medição utilizadas no ensaio são, para as bandas de um terço de oitava, entre 100 e 5000 Hz.

A forma da câmara reverberante deve normativamente ser tal que permita verificar a expressão (4.1) [1].

$$l_{m\acute{a}x} < 1,9V^{\frac{1}{3}} \approx 11,40 \text{ m} \quad (4.1)$$

Em que,

- $l_{m\acute{a}x}$  – comprimento da maior linha reta contida nos limites da câmara, em metros;
- $V$  – volume da câmara reverberante, em metros cúbicos.

Obtém-se  $l_{m\acute{a}x}$  através da expressão (4.2).

$$l_{m\acute{a}x} = \sqrt{7,463^2 + 5,871^2} \approx 9,49 \text{ m} \quad (4.2)$$

Sabendo que a câmara reverberante tem 216 m<sup>3</sup>, então da expressão (4.2) resulta:

$$9,49 < 11,40 \quad \text{O.K.} \quad (4.3)$$

A câmara reverberante apresenta no seu interior difusores suspensos que garantem um campo sonoro suficientemente difuso.

Uma vez que a câmara reverberante R1 tem um volume superior a 200 m<sup>3</sup>, então os valores normativos para a área de amostra devem ser multiplicados pelo fator  $(V/200)^{2/3}$  do qual resultam os valores para  $V=216 \text{ m}^3$  do Quadro 4.1.

A área de absorção sonora equivalente da câmara vazia, no domínio da frequência, deve ser regular e não apresentar picos nem depressões de amplitude superior a 15% da média dos valores correspondentes às duas bandas de terços de oitava adjacentes [1].

Quadro 4.1 – Área de absorção sonora equivalente máxima para câmaras com  $V=200\text{ m}^3$  [1] e R1 do Laboratório de Acústica da FEUP com um volume de  $216\text{ m}^3$ .

Frequência (Hz)	Área de absorção sonora equivalente ( $\text{m}^2$ )		Frequência (Hz)	Área de absorção sonora equivalente ( $\text{m}^2$ )	
	$V=200\text{ m}^3$	$V=216\text{ m}^3$		$V=200\text{ m}^3$	$V=216\text{ m}^3$
100	6,5	6,8	800	6,5	6,8
125	6,5	6,8	1000	7,0	7,4
160	6,5	6,8	1250	7,5	7,9
200	6,5	6,8	1600	8,0	8,4
250	6,5	6,8	2000	9,5	10,0
315	6,5	6,8	2500	10,5	11,1
400	6,5	6,8	3150	12,0	12,6
500	6,5	6,8	4000	13,0	13,7
630	6,5	6,8	5000	14,0	14,7

Segundo a norma NP EN ISO 354 [1], a área da amostra deve ser compreendida entre  $10$  a  $12\text{ m}^2$  para um volume igual ou inferior a  $200\text{ m}^3$ , o que implica no caso da câmara reverberante R1 a multiplicação pelo fator  $(V/200)^{2/3}$  que dá uma área máxima aproximada de  $12,6\text{ m}^2$ . A norma refere que a amostra deve ter forma retangular com uma relação entre largura e comprimento compreendida entre  $0,7$  e  $1,0$ , a sua localização deve ser tal que a distância recomendável de qualquer dos seus pontos às paredes da câmara seja pelo menos  $1\text{ m}$  (distância mínima não deve ser inferior a  $0,75\text{ m}$ ) e os seus lados não devem ficar, de preferência, paralelos às paredes adjacentes mais próximas da câmara.

As amostras utilizadas neste trabalho foram colocadas no pavimento de acordo com a norma NP EN ISO 354 [1] (Fig.4.1).



Fig. 4.1 – Manta usada no estudo ( $8\text{ m}^2$ ) [Foto do autor].

Os parâmetros que também influenciam as medições são a temperatura e humidade relativa, principalmente nas altas frequências. A temperatura durante o ensaio deve ser superior a 15 °C e a humidade relativa deve estar no intervalo de 30% e 90%.

Segundo a norma NP EN ISO 354 [1], os tempos de reverberação numa câmara reverberante podem ser medidos através de dois métodos de análise das curvas de decaimento: o método do ruído interrompido e o método das respostas impulsiva integrada. A curva de decaimento medida através do método do ruído interrompido resulta de um processo estatístico, calculado através da média das várias curvas de decaimento, ou tempos de reverberação, medidos para uma determinada posição da fonte e microfones. O método da resposta impulsiva integrada é um método sofisticado, pois as curvas de decaimento são obtidas através de funções determinísticas sem propensão a desvios estatísticos [1].

No trabalho elaborado no Laboratório de Acústica da FEUP utilizou-se o método do ruído interrompido para determinação dos tempos de reverberação. A disposição da amostra dentro da câmara foi feita de forma a cumprir a norma, utilizando-se microfones omnidirecionais (B&K) afastados entre si, no mínimo, de 1,5 a 2 m da fonte sonora e pelo menos a 1 m de distância das superfícies da câmara e da amostra.

Relativamente às fontes sonoras, utilizou-se duas (a diferença na potência radiada entre as duas é menor ou igual a 3 dB em cada banda de um terço de oitava) com radiação omnidirecional tendo-se variado a sua posição duas vezes, tal como nos microfones.

No método utilizado no presente trabalho, (método do ruído interrompido), é utilizada uma fonte sonora que apresenta um espectro de banda larga (ruído branco). Uma vez que se utiliza um ruído de banda larga e um analisador em tempo real, a norma refere que o espectro do ruído usado deve ser tal que as diferenças nos níveis de pressão sonora resultantes na câmara sejam menores que 6 dB em bandas de terço de oitava adjacentes [1]. Mais indica que o sinal das fontes sonora antes de ser interrompido, deverá ser suficientemente longo para produzir níveis de pressão sonora constantes nas várias bandas de frequência. Para se obter condições constantes, é aconselhado que o tempo de agitação seja pelo menos metade do tempo estimado para o tempo de reverberação esperado. O nível estabilizado do sinal de ensaio deve ser suficientemente elevado de modo a que o nível mínimo seja pelo menos 10 dB superior ao ruído de fundo [1].

Durante o trabalho foram realizadas várias medições em cada posição de fonte/microfone, por forma a diminuir a incerteza das medições, determinando a média de cada tipo de ensaio. Esta média pode ser calculada por dois métodos: método da média do conjunto e método da determinação dos tempos de reverberação em cada curva de decaimento individual.

O primeiro método consiste no cálculo da média das curvas de decaimento registadas para cada posição de fonte/microfone de acordo com a expressão (4.5) [1].

$$L_p(t) = 10 \log \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{pn}(t)}{10}} \right) \quad (4.4)$$

Em que,

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

O método utilizado no estudo foi o segundo que consistiu em fazer três medições para cada posição fonte/microfone (quatro posições), ou seja, são 48 curvas de decaimento, uma vez que se utilizaram quatro microfones. Através deste método são determinados os tempos de reverberação primeiro e depois é que é feita a média aritmética de todos os tempos resultando o tempo de reverberação final. Uma vez utilizado um sistema de aquisição controlado pelo computador, o tempo de reverberação deve ser calculado através de uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados [1].

O equipamento e o software utilizado durante os ensaios foram os seguintes:

- Sistema de aquisição de dados *Brüel & Kjaer PULSE* – tipo 3560-D;
- *Software* de aquisição e tratamento de dados *Brüel & Kjaer PULSE v. X*;
- Amplificador *LABGRUPPEN LAB300*;
- 2 fontes sonoras semiomnidirecionais JBL EON 15-62;
- 4 microfones *Brüel & Kjaer 1/2* – Tipo 4190;
- Calibrador *Brüel & Kjaer* – Tipo 4226;
- Termo higrómetro *Wm HTA 4200*.

#### 4.1.2. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

Após os ensaios realizados, os resultados obtidos são os tempos de reverberação médios da câmara sem e com amostra ( $T_1$  e  $T_2$ ) a partir de uma média aritmética do número total de medições. Posto isto, o coeficiente de absorção sonora é obtido através da expressão seguinte (4.5):

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (4.5)$$

Em que,

- $\alpha_s$  – Coeficiente de absorção sonora da amostra de ensaio 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 de absorção equivalente ( $A_T$ ) de toda a amostra de ensaio é calculada pela expressão (4.6) [1].

$$A_T = A_2 - A_1 \quad [m^2] \quad (4.6)$$

Em que  $A_1$  é a área de absorção equivalente da câmara reverberante sem amostra ( $m^2$ ) calculado através da expressão (4.7) e  $A_2$  é a área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante com a amostra de ensaio ( $m^2$ ) calculado pela expressão (4.8).

$$A_1 = \frac{55,3V}{c_1 T_1} - m_1 V \quad [m^2] \quad (4.7)$$

$$A_2 = \frac{55,3V}{c_2 T_2} - m_2 V \quad [m^2] \quad (4.8)$$

Em que,

- $V$  – Volume de câmara reverberante vazia ( $m^3$ );

- $c_1$  – celeridade de propagação do som no ar (m/s) calculada pela expressão (2.2) utilizando a temperatura na câmara reverberante vazia durante o respetivo ensaio;
- $c_2$  - celeridade de propagação do som no ar (m/s) calculada pela expressão (2.2) utilizando a temperatura na câmara reverberante com a amostra durante o respetivo ensaio;
- $T_1$  – tempo de reverberação da câmara reverberante sem amostra (s);
- $T_2$  - tempo de reverberação da câmara reverberante com a amostra (s);
- $m_1$  e  $m_2$  – absorção sonora do ar ( $m^{-1}$ ), em função da humidade relativa da câmara reverberante vazia.

#### 4.2. AMOSTRA

A amostra utilizada no estudo é denominada de Palletten-Etikett. É um material poroso constituído por uma camada fina, com 8 mm de espessura, de espuma densa que lhe atribui características absorventes (Fig. 4.1). Uma vez que o objetivo do trabalho é verificar o efeito da área da amostra no coeficiente de absorção, dividiu-se a amostra em retângulos iguais com dimensões de 2 m<sup>2</sup> (1,25 m x 1,6 m) e 1 m<sup>2</sup> (1,25 m x 0,8 m). O Quadro 4.2 ilustra as configurações realizadas nos ensaios e respetivas designações atribuídas.

Quadro 4.2 – Áreas utilizadas nos ensaios e respetivas designações das amostras.

Designação	Área (m <sup>2</sup> )	Dimensões (m)	Perímetro (m)
<b>S1</b>	1	1,25 x 0,80	4,10
<b>S2</b>	2	1,25 x 1,60	5,70
<b>S3</b>	3	1,25 x 2,40	7,30
<b>S4</b>	4	1,25 x 3,20	8,90
<b>S5</b>	5	1,25 x 3,20 + 1,25 x 0,80	11,40
<b>S6</b>	6	1,25 x 3,20 + 1,25 x 1,60	11,40
<b>S7</b>	7	1,25 x 3,20 + 1,25 x 2,40	11,40
<b>S8</b>	8	2,50 x 3,20	11,40
<b>S9</b>	9	2,50 x 3,20 + 1,25 x 0,80	13,90
<b>S10</b>	10	2,50 x 3,20 + 1,25 x 1,60	13,90
<b>S10 ESP</b> (amostra espalhada)	10	5 x (1,25 x 1,60)	17,10
<b>S11</b>	11	2,50 x 3,20 + 1,25 x 2,40	13,90
<b>S12</b>	12	3,75 x 3,20	13,90

As amostras foram colocadas o mais unidas possível no meio da câmara reverberante, para haver o menor número de espaços vazios entre as amostras, exceto a amostra do tipo S10 ESP, que foi espalhada pela câmara reverberante em blocos de 2 m<sup>2</sup> com o objetivo do estudo da variação do  $\alpha$  devido a disposição da amostra na sala. Este espalhamento consistiu em colocar uma amostra

de 2 m<sup>2</sup> no centro da câmara reverberante e quatro amostras de 2 m<sup>2</sup> nos quatro cantos, dispostas no piso da câmara reverberante. A figura mostra o material utilizado no estudo (Fig. 4.2 e Fig. 4.3).



Fig. 4.2 – Manta usada no estudo (12 m<sup>2</sup>) [Foto do autor].



Fig. 4.3 – Manta espalhada (S10 ESP) [Foto do autor].

## 5

## RESULTADOS

## 5.1. EFEITO DO TAMANHO DA AMOSTRA

## 5.1.1. Amostras

Agruparam-se as amostras S1, S2 e S3 para comparar a evolução da variação do coeficiente de absorção sonora para os três tipos de disposição nas muito pequenas áreas. São constituídas por 1 m<sup>2</sup>, 2 m<sup>2</sup> e 3 m<sup>2</sup>, respetivamente, e dispostas centradas no piso da câmara reverberante R1 para a realização do ensaio. No Quadro 5.1 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios efetuados às amostras com uma área de absorção total de amostra ( $A_T$ ) e os coeficientes de absorção correspondentes para cada frequência ( $\alpha_s$ ).

Quadro 5.1 – Área de absorção sonora equivalente total ( $A_T$ ) e coeficiente de absorção sonora ( $\alpha_s$ ) dos ensaios realizados a S1, S2 e S3.

Frequência (Hz)	S1 (1 m <sup>2</sup> )		S2 (2 m <sup>2</sup> )		S3 (3 m <sup>2</sup> )	
	$A_T$ (m <sup>2</sup> )	$\alpha_s$	$A_T$ (m <sup>2</sup> )	$\alpha_s$	$A_T$ (m <sup>2</sup> )	$\alpha_s$
100	0,0355	0,04	0,0368	0,02	0,1536	0,05
125	0,0386	0,04	0,1181	0,06	0,1855	0,06
160	0,1324	0,13	0,2753	0,14	0,4623	0,15
200	0,1506	0,15	0,1708	0,09	0,4063	0,14
250	0,1126	0,11	0,3239	0,16	0,6282	0,21
315	0,1635	0,16	0,3822	0,19	0,6897	0,23
400	0,1211	0,12	0,3601	0,18	0,6539	0,22
500	0,1773	0,18	0,4463	0,22	0,8528	0,28
630	0,2517	0,25	0,5290	0,26	0,9326	0,31
800	0,3405	0,34	0,7019	0,35	1,0560	0,35
1000	0,3514	0,35	0,7953	0,40	1,3459	0,45
1250	0,4946	0,49	0,9511	0,48	1,4841	0,49
1600	0,5729	0,57	1,1966	0,60	1,7024	0,57
2000	0,6208	0,62	1,3439	0,67	1,8828	0,63
2500	0,7245	0,72	1,4461	0,72	2,0273	0,68
3150	0,7883	0,79	1,4362	0,72	2,1789	0,73
4000	0,7834	0,78	1,4854	0,74	2,2673	0,76
5000	0,9060	0,91	1,5554	0,78	2,2660	0,76

Ao observar os resultados do Quadro 5.1 verifica-se um material com maior capacidade de absorção nas altas frequências. A Fig. 5.1 mostra sob a forma de gráfico o coeficiente de absorção sonora para cada frequência dos três tipos de amostras.

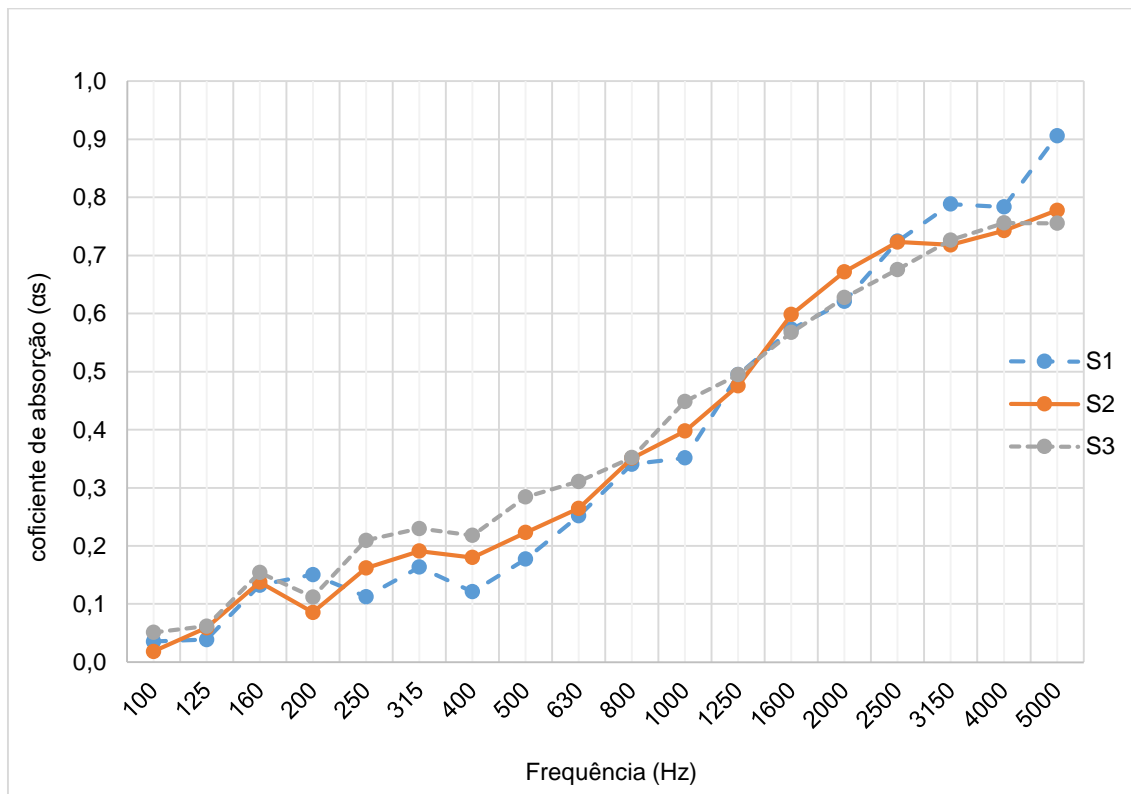


Fig. 5.1 – Evolução dos valores do coeficiente de absorção para cada frequência de S1 (1 m<sup>2</sup>), S2 (2 m<sup>2</sup>) e S3 (3 m<sup>2</sup>).

Analisando o gráfico, deteta-se uma variação grande no coeficiente de absorção sonora até aos 2000 Hz para a amostra S1, onde se verifica uma oscilação de valores muito acentuada. Embora se verifique esta variação, para uma área tão reduzida nota-se um coeficiente de absorção sonora muito elevado nas altas frequências, que se verificará posteriormente que este resultado não é o correspondente. Este facto pode ser explicado pela expressão (4.6), a utilizada para o cálculo do coeficiente de absorção sonora, uma vez que se verifica que a área de absorção sonora equivalente ( $A_T$ ) é igual ao  $\alpha_s$ , visto que a área de amostra ( $S$ ) é igual a 1 m<sup>2</sup>.

No caso de S2 a amostra duplicou, no que diz respeito à dimensão, em relação a S1 onde se verifica um acréscimo do coeficiente de absorção sonora em todas as frequências, exceto nas altas frequências, verificando-se nesta fase um decréscimo de  $\alpha_s$ . Verifica-se incerteza do  $\alpha_s$  até 1250 Hz, o que traduz em dúvida quanto aos valores apresentados. Este facto pode ser explicado devido a reduzida área de amostra testada, muito abaixo do valor da norma (10 m<sup>2</sup>) que implica testar áreas mais elevadas para tornar o valor de  $\alpha_s$  mais próximo do valor real.

Para o caso da amostra S3, a área aumenta para 3 m<sup>2</sup> e a variação é menor em relação a S2, embora se nota que continua a subir o valor de  $\alpha_s$ , em menor escala, nas frequências inferiores a 1250 Hz. A incerteza neste caso diminuiu, verificando-se maior linearidade nos resultados, embora que

abaixo dos 500 Hz os valores apresentem balanceamentos denunciados, que conduzem a valores pouco precisos nestas bandas de frequência.

Em seguida, agruparam-se as amostras S4, S5 e S6 para comparar a evolução da variação do coeficiente de absorção sonora para os três tipos de disposição nas pequenas áreas. No Quadro 5.2 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios efetuados às amostras com uma área total de amostra ( $A_T$ ) e os coeficientes de absorção correspondentes para cada frequência. Para uma análise mais clara, mostra-se sobe a forma de gráfico os coeficientes de absorção sonora para cada frequência da amostra com 4 m<sup>2</sup> (S4), 5 m<sup>2</sup> (S5) e 6 m<sup>2</sup> (S6) na Fig. 5.2.

Quadro 5.2 - Área de absorção sonora equivalente total ( $A_T$ ) e coeficiente de absorção sonora ( $\alpha_s$ ) dos ensaios realizados a S4, S5 e S6.

Frequência (Hz)	S4 (4 m <sup>2</sup> )		S5 (5 m <sup>2</sup> )		S6 (6 m <sup>2</sup> )	
	$A_T$ (m <sup>2</sup> )	$\alpha_s$	$A_T$ (m <sup>2</sup> )	$\alpha_s$	$A_T$ (m <sup>2</sup> )	$\alpha_s$
100	0,0403	0,01	0,1327	0,03	0,2124	0,04
125	0,2538	0,06	0,2230	0,04	0,4964	0,08
160	0,5963	0,15	0,7396	0,15	0,7755	0,13
200	0,5263	0,13	0,7418	0,15	0,7508	0,13
250	0,6139	0,15	0,9109	0,18	1,0014	0,17
315	0,7876	0,20	0,9857	0,20	0,9832	0,16
400	0,7941	0,20	1,0234	0,20	1,1699	0,19
500	1,0596	0,26	1,3417	0,27	1,5659	0,26
630	1,1772	0,29	1,4629	0,29	1,7260	0,29
800	1,3255	0,33	1,6047	0,32	1,9304	0,32
1000	1,6048	0,40	1,9590	0,39	2,2842	0,38
1250	1,7262	0,43	2,1115	0,42	2,6183	0,44
1600	2,0167	0,50	2,5492	0,51	3,1408	0,52
2000	2,3171	0,58	2,9181	0,58	3,5269	0,59
2500	2,5632	0,64	3,3152	0,66	3,8489	0,64
3150	2,7071	0,68	3,5183	0,70	4,0474	0,67
4000	2,7596	0,69	3,5156	0,70	4,3116	0,72
5000	2,6906	0,67	3,3668	0,67	4,1933	0,70

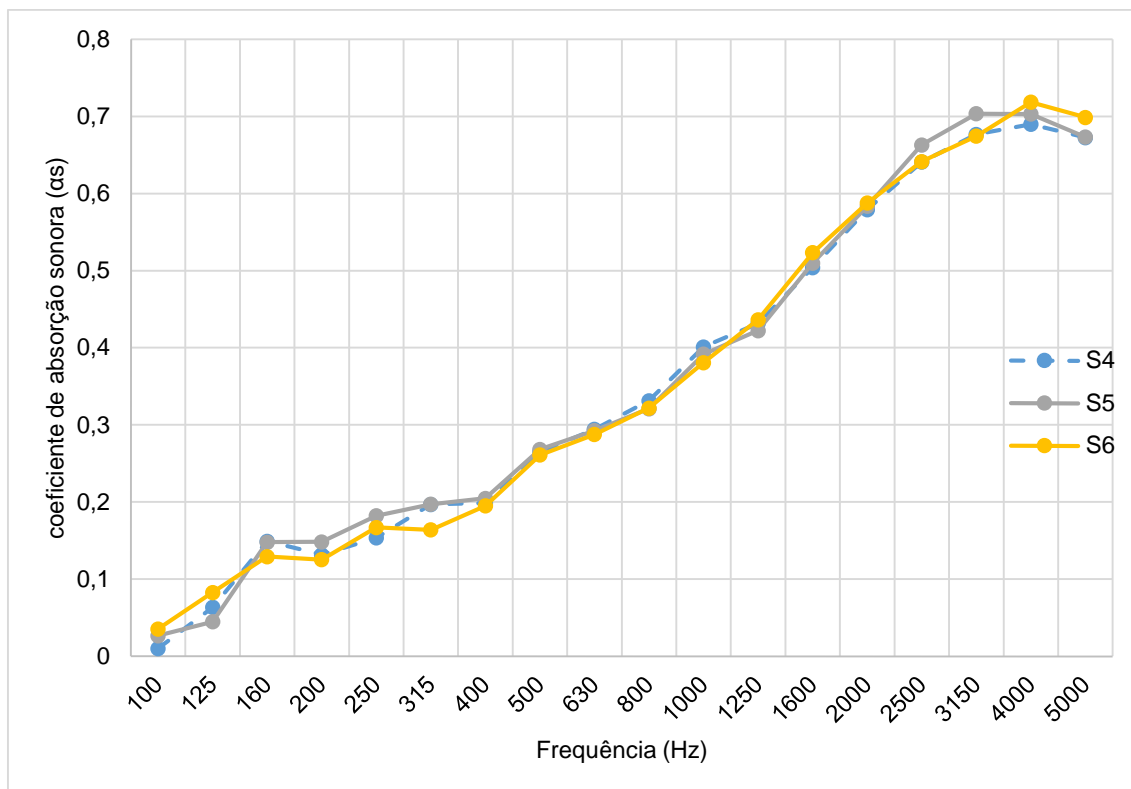


Fig. 5.2 – Evolução dos valores do coeficiente de absorção para cada frequência de S4 (4 m<sup>2</sup>), S5 (5 m<sup>2</sup>) e S6 (6 m<sup>2</sup>).

Verifica-se uma proximidade entre as curvas S4, S5 e S6, em que o coeficiente de absorção sonora pouco variou, nas altas frequências, em relação a S3. Nota-se maior linearidade nas baixas frequências e nas altas frequências já é notória a linearidade de resultados.

A variação começa a ser menor em S5, e comparando com S4 apenas se verifica diferenças ligeiras nas baixas frequências (por exemplo: para a frequência de 1000, S4 tem um  $\alpha_s=0,40$  e S5 tem um  $\alpha_s=0,39$ ), sendo que em S5 apresenta maior consistência da curva. Nesta fase, consegue-se verificar que a curva que caracteriza o coeficiente de absorção sonora se manterá próxima destes valores, isto porque a variação de  $\alpha_s$  começa a ser muito pequena a medida que se aumenta a área de amostra.

Agruparam-se as amostras S7, S8 e S9 para comparar a evolução da variação do coeficiente de absorção sonora para os três tipos de disposição nas médias áreas. A área vai aumentando em cada tipo de amostra, mas verifica-se um  $\alpha_s$  muito idêntico.

Para tal análise, mostra-se de seguida o quadro de resultados para cada tipo de amostra (Quadro 5.3) e de seguida o respetivo gráfico (Fig. 5.3) para clarificar os resultados obtidos.

Quadro 5.3 - Área de absorção sonora equivalente total ( $A_T$ ) e coeficiente de absorção sonora ( $\alpha_s$ ) do ensaio realizado a S7, S8 e S9.

Frequência (Hz)	S7 (7 m <sup>2</sup> )		S8 (8 m <sup>2</sup> )		S9 (9 m <sup>2</sup> )	
	$A_T$ (m <sup>2</sup> )	$\alpha_s$	$A_T$ (m <sup>2</sup> )	$\alpha_s$	$A_T$ (m <sup>2</sup> )	$\alpha_s$
100	0,0601	0,01	0,2066	0,03	0,3237	0,04
125	0,3330	0,05	0,2426	0,03	0,3666	0,04
160	0,8028	0,11	0,8437	0,11	1,0114	0,11
200	0,8383	0,12	0,8256	0,10	0,9198	0,10
250	1,1131	0,16	1,2506	0,16	1,4169	0,16
315	1,2555	0,18	1,3503	0,17	1,4639	0,16
400	1,4085	0,20	1,5988	0,20	1,7821	0,20
500	1,8777	0,27	2,0364	0,25	2,2106	0,25
630	2,0238	0,29	2,2778	0,28	2,5651	0,29
800	2,3014	0,33	2,5975	0,32	2,8957	0,32
1000	2,6345	0,38	3,0027	0,38	3,3481	0,37
1250	2,9592	0,42	3,4539	0,43	3,9770	0,44
1600	3,4211	0,49	4,0167	0,50	4,6107	0,51
2000	4,1020	0,59	4,5836	0,57	5,1851	0,58
2500	4,4468	0,64	5,1156	0,64	5,8342	0,65
3150	4,6994	0,67	5,3669	0,67	6,2364	0,69
4000	5,0170	0,72	5,6698	0,71	6,2350	0,69
5000	5,0171	0,72	5,7199	0,71	6,5019	0,72

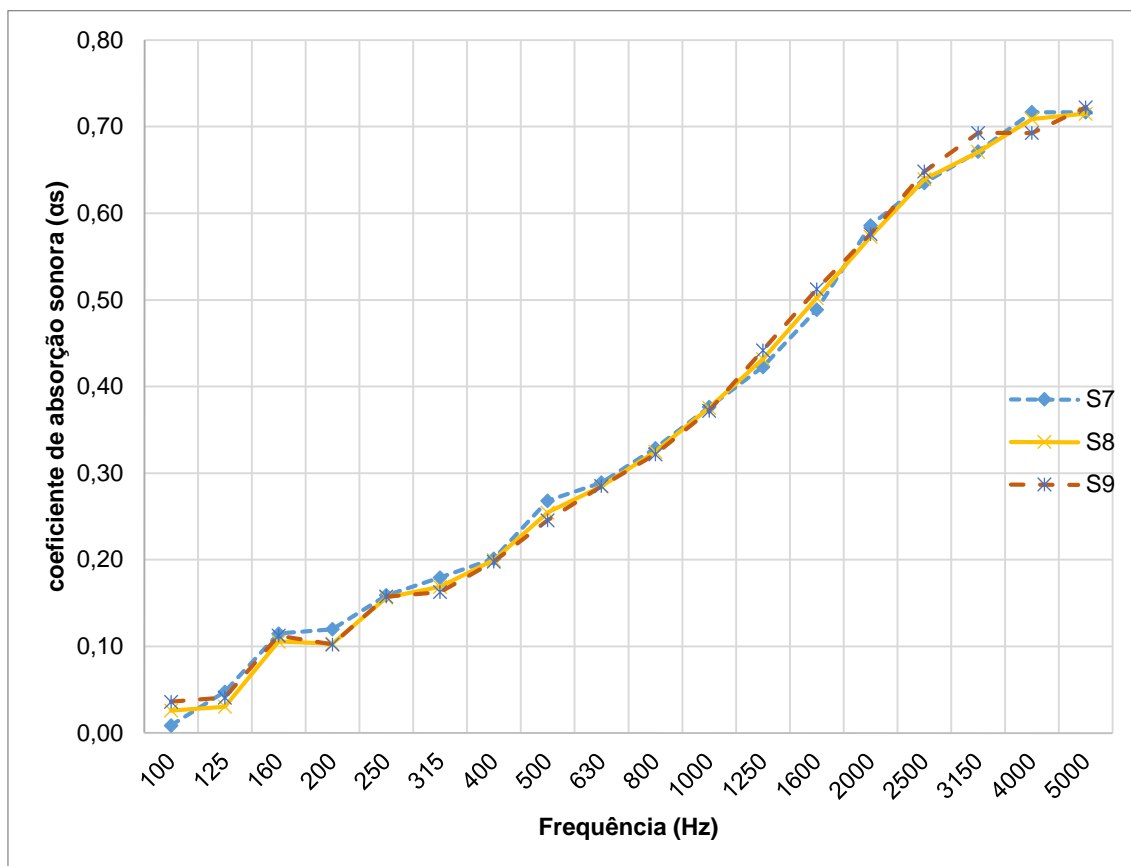


Fig. 5.3 – Evolução dos valores do coeficiente de absorção para cada frequência de S7 (7 m<sup>2</sup>), S8 (8 m<sup>2</sup>) e S9 (9 m<sup>2</sup>).

Analisando o gráfico, verifica-se que o coeficiente de absorção da amostra se mantém praticamente constante para os três tipos de configuração, ou seja, o ensaio realizado para 7 m<sup>2</sup>, para 8 m<sup>2</sup> ou 9 m<sup>2</sup> obtêm-se valores idênticos do  $\alpha_s$ .

Agruparam-se as amostras S10, S11 e S12 para comparar a evolução da variação do coeficiente de absorção sonora para os três tipos de disposição nas grandes áreas. Uma vez que nestes três ensaios a norma NP EN ISO 354 [1] foi cumprida, ou seja, as áreas usadas encontram-se nos intervalos de 10 a 12 m<sup>2</sup>, serão utilizados estes resultados como valores de referência para comparação com resultados obtidos com áreas inferiores. A área vai aumentando em cada tipo de amostra, mas verifica-se um  $\alpha_s$  muito idêntico. Para tal análise, mostra-se de seguida o quadro 5.4 de resultados para cada tipo de amostra e de seguida o respetivo gráfico (Fig. 5.4) para clarificar os resultados obtidos.

Quadro 5.4 - Área de absorção sonora equivalente total ( $A_T$ ) e coeficiente de absorção sonora ( $\alpha_s$ ) do ensaio realizado a S10, S11 e S12.

Frequência (Hz)	$A_T$ (m <sup>2</sup> )	$\alpha_s$ (S10)	$A_T$ (m <sup>2</sup> )	$\alpha_s$ (S11)	$A_T$ (m <sup>2</sup> )	$\alpha_s$ (S12)
100	0,0798	0,01	0,4532	0,04	0,3126	0,03
125	0,4506	0,05	0,5698	0,05	0,7091	0,06
160	0,9608	0,10	1,1418	0,10	1,1633	0,10
200	0,9148	0,09	1,1971	0,11	1,5625	0,13
250	1,6691	0,17	1,7685	0,16	1,6736	0,14
315	1,6447	0,16	1,8563	0,17	2,0848	0,17
400	1,9519	0,20	2,1028	0,19	2,3951	0,20
500	2,3828	0,24	2,5814	0,23	2,9071	0,24
630	2,7789	0,28	3,1494	0,29	3,3920	0,28
800	3,2387	0,32	3,6158	0,33	3,8576	0,32
1000	3,7807	0,38	4,1976	0,38	4,5596	0,38
1250	4,2847	0,43	4,7779	0,43	5,1704	0,43
1600	5,1069	0,51	5,7146	0,52	6,0936	0,51
2000	5,7887	0,58	6,3986	0,58	6,9000	0,57
2500	6,5150	0,65	7,0241	0,64	7,5622	0,63
3150	6,8720	0,69	7,4880	0,68	8,0148	0,67
4000	6,9767	0,70	7,7504	0,70	8,2007	0,68
5000	6,9089	0,69	7,9086	0,72	8,5319	0,71

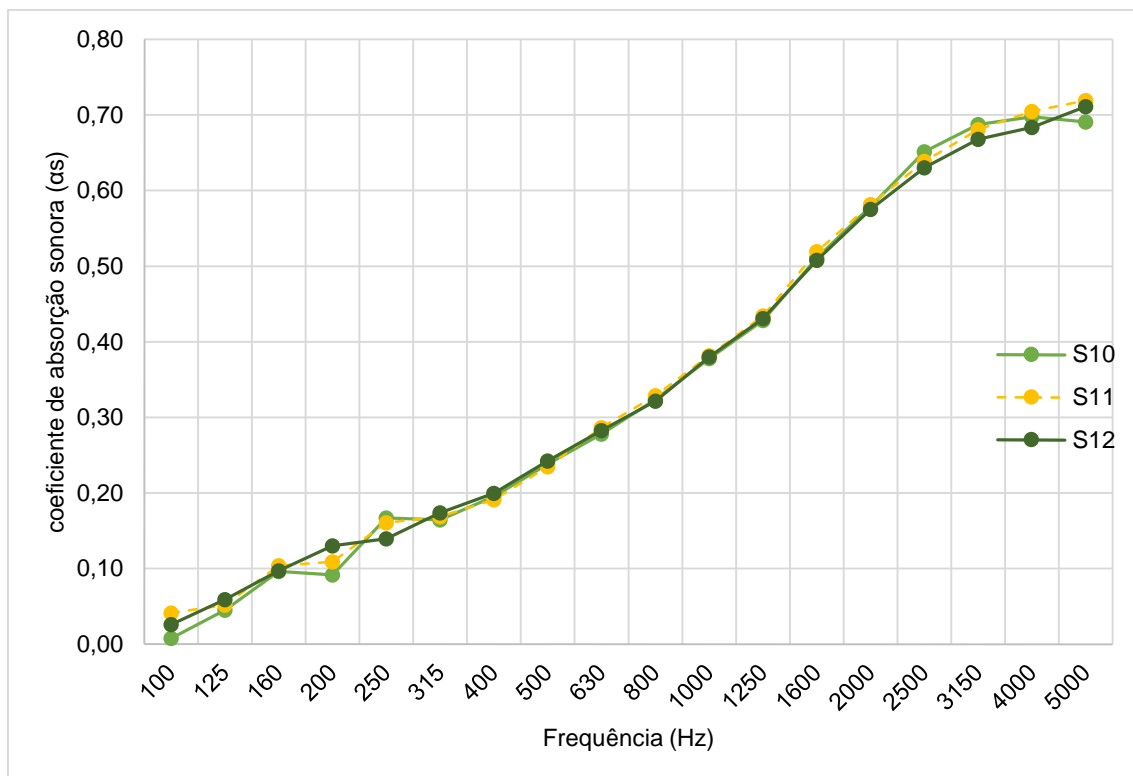


Fig. 5.4 – Evolução dos valores do coeficiente de absorção para cada frequência de S10 (S=10 m<sup>2</sup>), S11 (11 m<sup>2</sup>) e S12 (12 m<sup>2</sup>).

Analisando a Fig. 5.4, verifica-se que o coeficiente de absorção sonora da amostra não se altera com o aumento da área da amostra. Ou seja, a área aumenta, mas não afeta o coeficiente de absorção, comprovando que existe uma “área mínima” necessária para a determinação do  $\alpha_s$  abaixo da requerida pela norma. Pela análise das figuras (Fig. 5.1 até Fig. 5.4) repara-se que a partir da amostra S5 pouco se altera o valor de  $\alpha_s$ . Para se comprovar qual o efeito que a área tem no coeficiente de absorção sonora, utilizaram-se outros parâmetros de comparação para tornar mais clara a análise. Os quadros 5.5 e 5.7 apresentam o coeficiente de absorção sonora de todas amostras em 1/3 oitava e 1/1 oitava, respectivamente. Os Quadros 5.6 e 5.8 apresentam o desvio padrão e desvio padrão relativo a  $\alpha_{12}$ , e as respectivas figuras (Fig. 5.5 até 5.8) para ilustrar a dispersão de valores do coeficiente de absorção sonora

Na Fig. 5.5 mostra-se no todos os resultados compilados num só gráfico para se perceber em que gama de valores se situa o coeficiente de absorção sonora com a variação da área da amostra. Uma vez que a interpretação dos resultados se torna difícil devido à sobreposição dos gráficos, dividiu-se em dois gráficos (Fig. 5.6 e Fig. 5.7) em que o primeiro analisa as “baixas frequências”, até 800 Hz e o segundo analisa as “altas frequências”, superiores a 800 Hz. Conclui-se com a análise de  $\alpha_s$  que a área da amostra suficiente para determinação do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante é 5 m<sup>2</sup>, uma vez que apresenta uma curva de valores muito idêntica a de S12.

Quadro 5.5 – Coeficiente de absorção sonora para todas as amostras, em 1/3 de oitava.

Freq. (Hz)	$\alpha_s$											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
100	0,04	0,02	0,05	0,01	0,03	0,04	0,01	0,03	0,04	0,01	0,04	0,03
125	0,04	0,06	0,06	0,06	0,04	0,08	0,05	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
160	0,13	0,14	0,15	0,15	0,15	0,13	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10
200	0,15	0,09	0,11	0,13	0,15	0,13	0,12	0,10	0,10	0,09	0,11	0,13
250	0,11	0,16	0,21	0,15	0,18	0,17	0,16	0,16	0,16	0,17	0,16	0,14
315	0,16	0,19	0,23	0,20	0,20	0,16	0,18	0,17	0,16	0,16	0,17	0,17
400	0,12	0,18	0,22	0,20	0,20	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,19	0,20
500	0,18	0,22	0,28	0,26	0,27	0,26	0,27	0,25	0,25	0,24	0,23	0,24
630	0,25	0,26	0,31	0,29	0,29	0,29	0,29	0,28	0,29	0,28	0,29	0,28
800	0,34	0,35	0,35	0,33	0,32	0,32	0,33	0,32	0,32	0,32	0,33	0,32
1000	0,35	0,40	0,45	0,40	0,39	0,38	0,38	0,38	0,37	0,38	0,38	0,38
1250	0,49	0,48	0,49	0,43	0,42	0,44	0,42	0,43	0,44	0,43	0,43	0,43
1600	0,57	0,60	0,57	0,50	0,51	0,52	0,49	0,50	0,51	0,51	0,52	0,51
2000	0,62	0,67	0,63	0,58	0,58	0,59	0,59	0,57	0,58	0,58	0,58	0,57
2500	0,72	0,72	0,68	0,64	0,66	0,64	0,64	0,64	0,65	0,65	0,64	0,63
3150	0,79	0,72	0,73	0,68	0,70	0,67	0,67	0,67	0,69	0,69	0,68	0,67
4000	0,78	0,74	0,76	0,69	0,70	0,72	0,72	0,71	0,69	0,70	0,70	0,68
5000	0,91	0,78	0,76	0,67	0,67	0,70	0,72	0,71	0,72	0,69	0,72	0,71

Quadro 5.6 – Desvio-padrão e desvio-padrão relativo a  $\alpha_{12}$  dos valores do coeficiente de absorção sonora, em 1/3 de oitava.

Freq. (Hz)	Desvio-padrão (s)	Desvio-padrão relativo (s/ $\alpha_{12}$ )
100	0,01	0,53
125	0,01	0,24
160	0,02	0,21
200	0,02	0,16
250	0,02	0,16
315	0,02	0,12
400	0,02	0,12
500	0,03	0,11
630	0,01	0,05
800	0,01	0,04
1000	0,02	0,06
1250	0,03	0,06
1600	0,03	0,07
2000	0,03	0,05
2500	0,03	0,05
3150	0,03	0,05
4000	0,03	0,04
5000	0,06	0,09

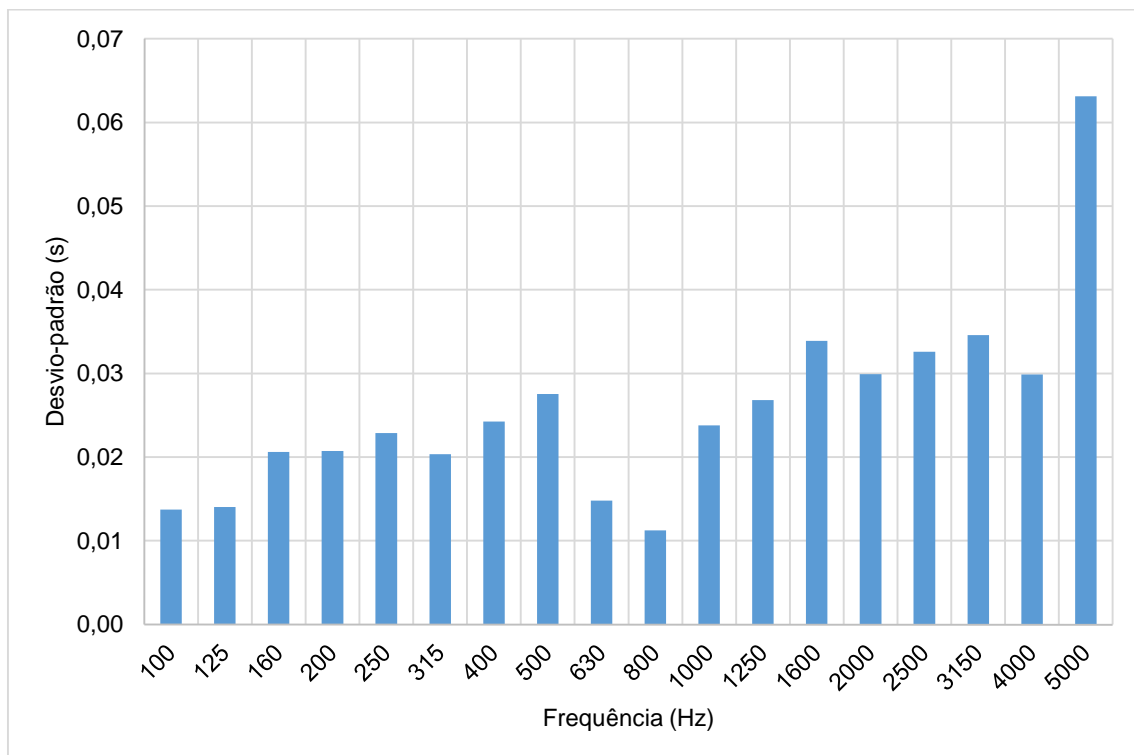


Fig. 5.5 – Desvio padrão dos valores de  $\alpha_s$  para as bandas de frequência de 1/3 de oitava.

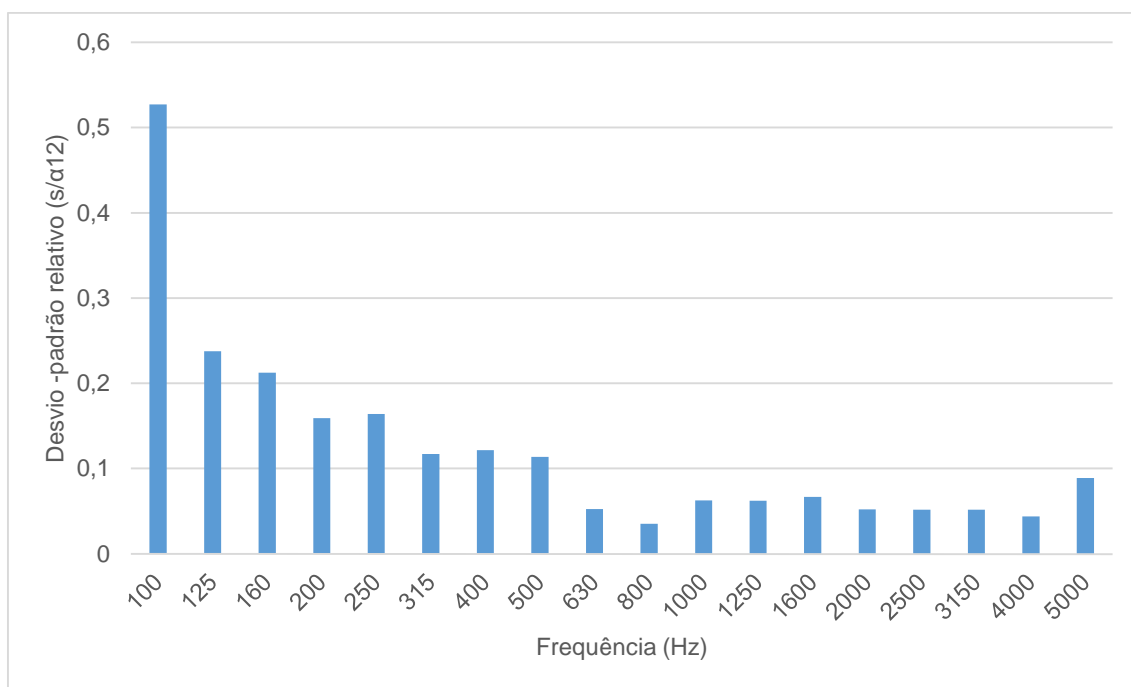


Fig. 5.6 – Desvio padrão relativo a  $\alpha_{12}$  dos valores de  $\alpha_s$  para as bandas de frequência de 1/3 de oitava.

Quadro 5.7 – Coeficiente de absorção sonora para todas as amostras, em 1/1 de oitava.

Freq. (Hz)	$\alpha_s$											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
125	0,07	0,07	0,09	0,07	0,07	0,08	0,06	0,05	0,06	0,05	0,07	0,06
250	0,14	0,15	0,18	0,16	0,18	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15
500	0,18	0,22	0,27	0,25	0,26	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,24
1000	0,40	0,41	0,43	0,39	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
2000	0,64	0,66	0,62	0,57	0,59	0,58	0,57	0,57	0,58	0,58	0,58	0,57
4000	0,83	0,75	0,75	0,68	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70	0,69	0,70	0,69

Quadro 5.8 – Desvio-padrão e desvio-padrão relativo a  $\alpha_{12}$  dos valores do coeficiente de absorção sonora, em 1/1 de oitava.

Freq. (Hz)	Desvio-padrão (s)	Desvio-padrão relativo (s/α <sub>12</sub> )
125	0,01	0,19
250	0,01	0,10
500	0,02	0,09
1000	0,02	0,05
2000	0,03	0,05
4000	0,04	0,06

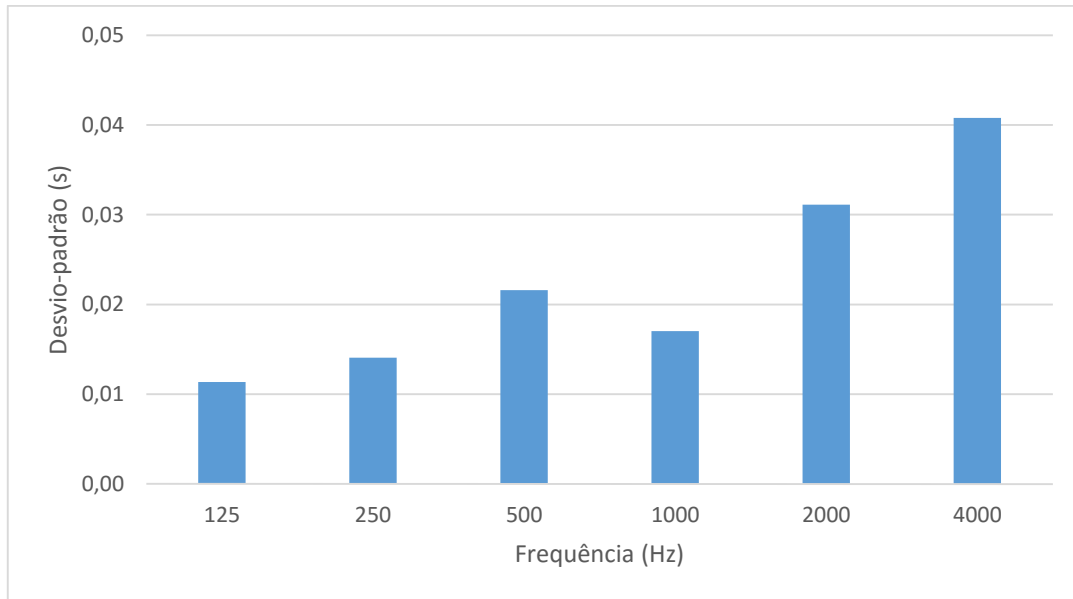


Fig. 5.7 – Desvio padrão dos valores de  $\alpha_s$  para as bandas de frequência de 1/1 de oitava.

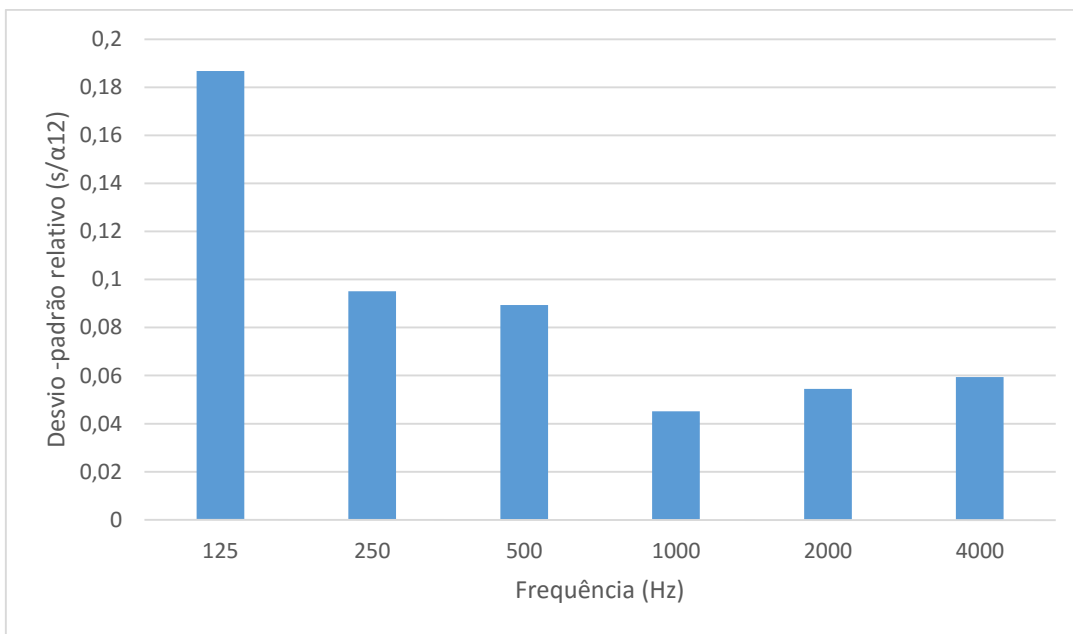


Fig. 5.8 – Desvio padrão relativo a  $\alpha_{12}$  dos valores de  $\alpha_s$  para as bandas de frequência de 1/1 de oitava.

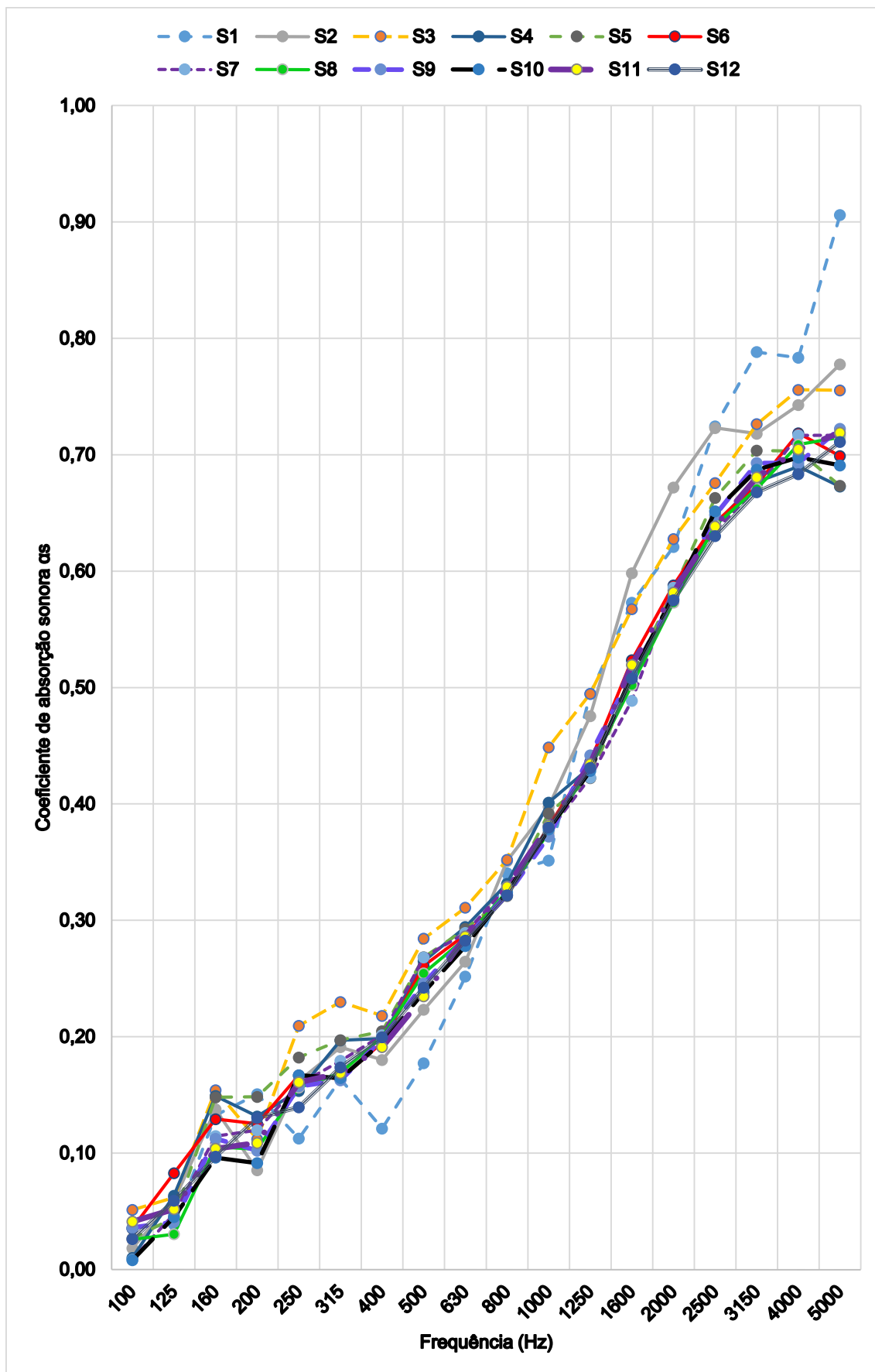


Fig. 5.9 - Evolução dos valores do coeficiente de absorção para cada frequência de todos os tipos de amostra.

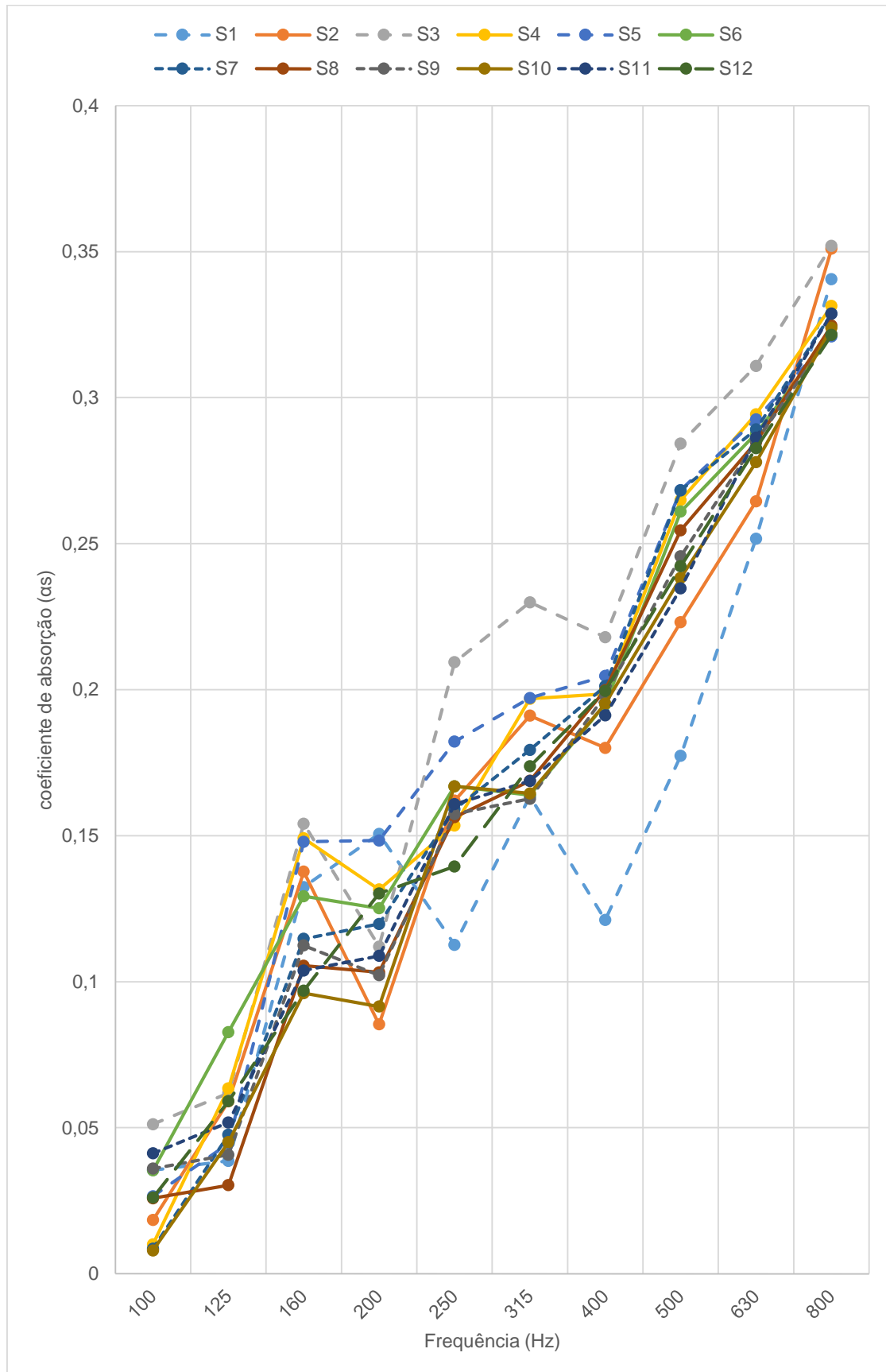


Fig. 5.10 - Evolução dos valores do coeficiente de absorção para frequências  $\leq 800$  Hz de todos os tipos de amostra.

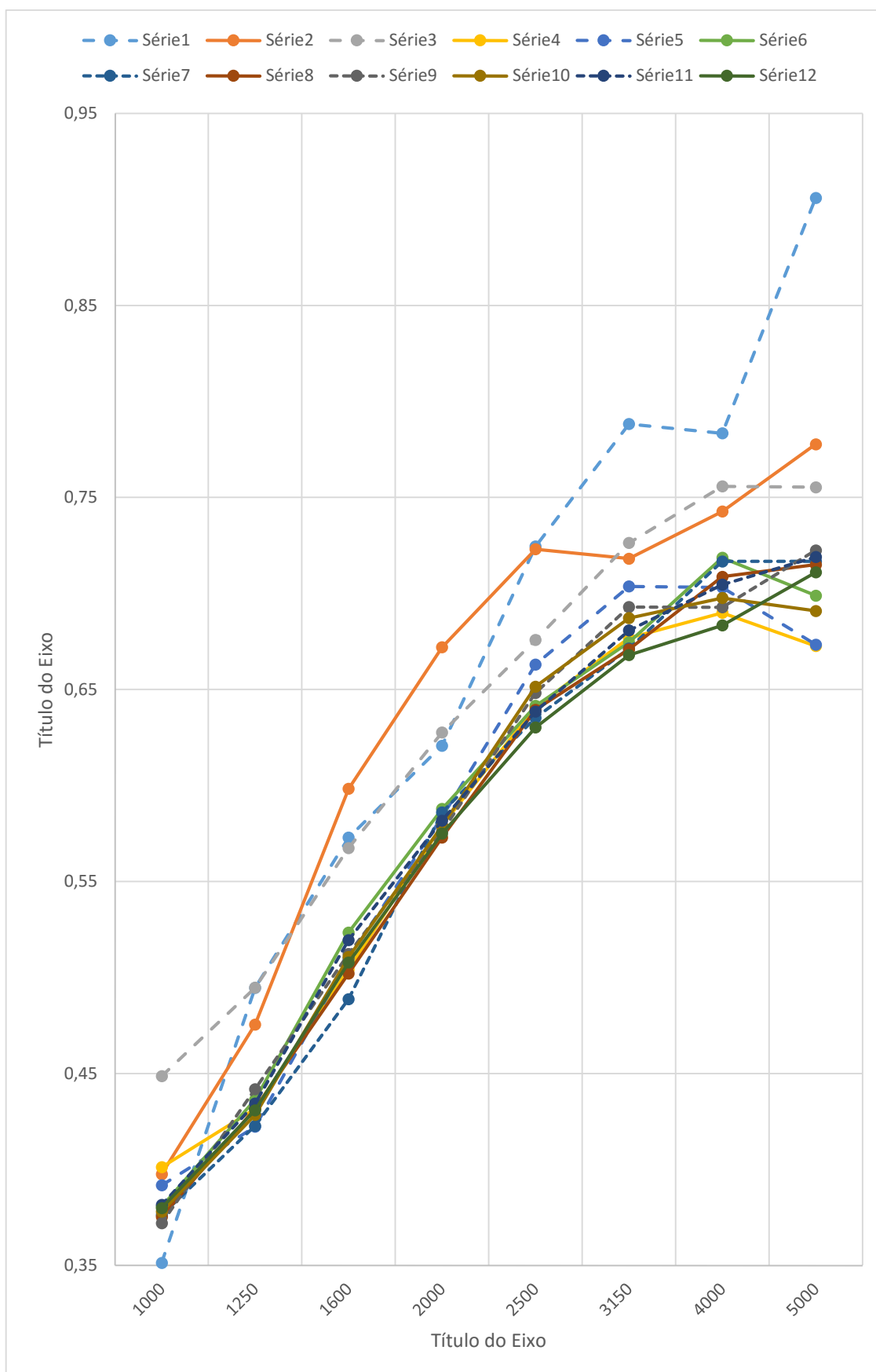


Fig. 5.11 - Evolução dos valores do coeficiente de absorção para frequências >800 Hz de todos os tipos de amostra.

5.1.2. VARIABILIDADE DO  $\alpha_s$

De forma a entender qual a variabilidade dos valores do coeficiente de absorção sonora, comparou-se a diferença entre os  $\alpha_i$  (coeficiente de absorção sonora corresponde a  $i \text{ m}^2$ ) todos com o  $\alpha_{12}$  (coeficiente de absorção sonora para a área de  $12 \text{ m}^2$ ), dividindo pelo  $\alpha_{12}$ . Para tal, utilizaram-se 5 bandas de frequência (250, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz) e representam-se na Fig. 5.12 até Fig. 5.17 os resultados obtidos para cada banda de frequência.

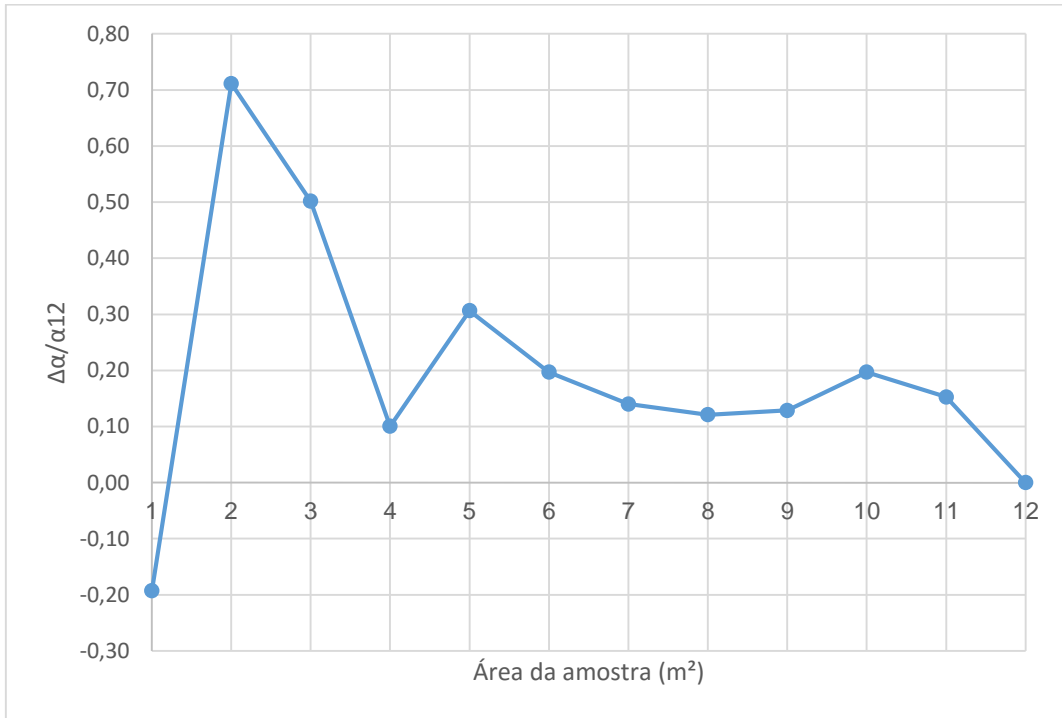


Fig. 5.12 – Variabilidade do  $\alpha_s$  face ao valor de referência ( $S=12 \text{ m}^2$ ) para a banda de frequência de 250 Hz (1/3 oitava).

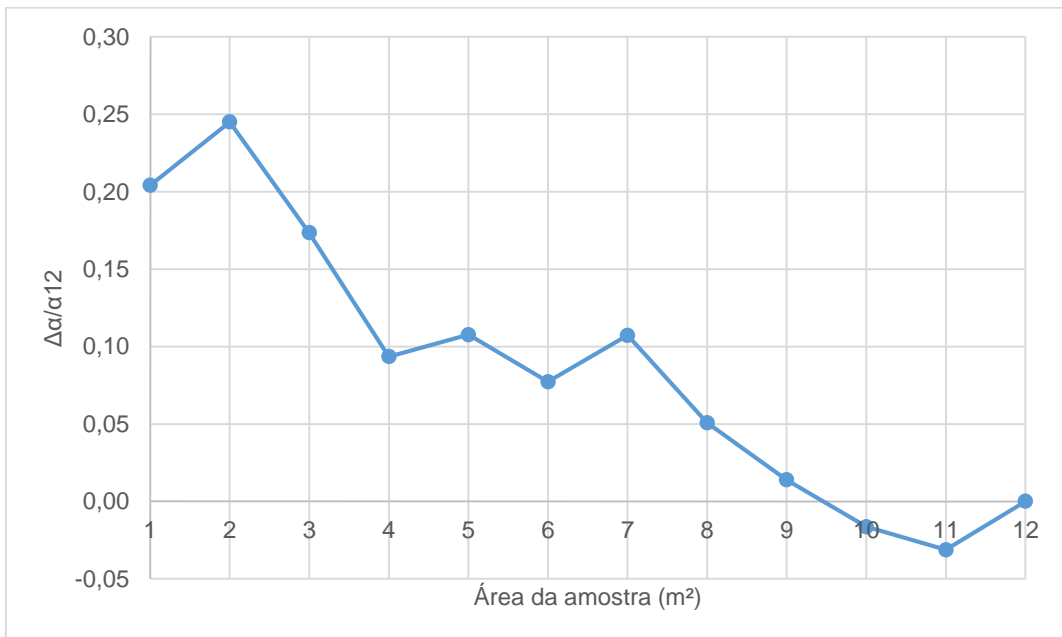


Fig. 5.13 – Variabilidade do  $\alpha_s$  face ao valor de referência ( $S=12 \text{ m}^2$ ) para a banda de frequência de 500 Hz (1/3 oitava).

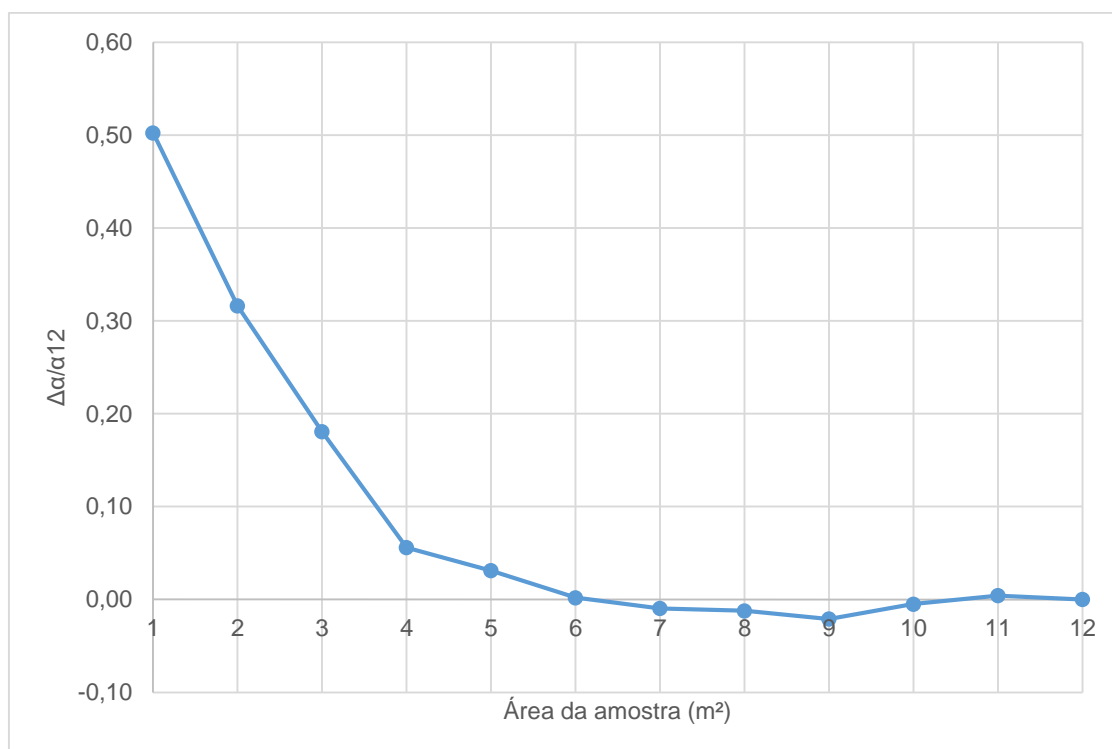


Fig. 5.14 – Variabilidade do  $\alpha_s$  face ao valor de referência ( $S=12 \text{ m}^2$ ) para a banda de frequência de 1000 Hz (1/3 oitava).

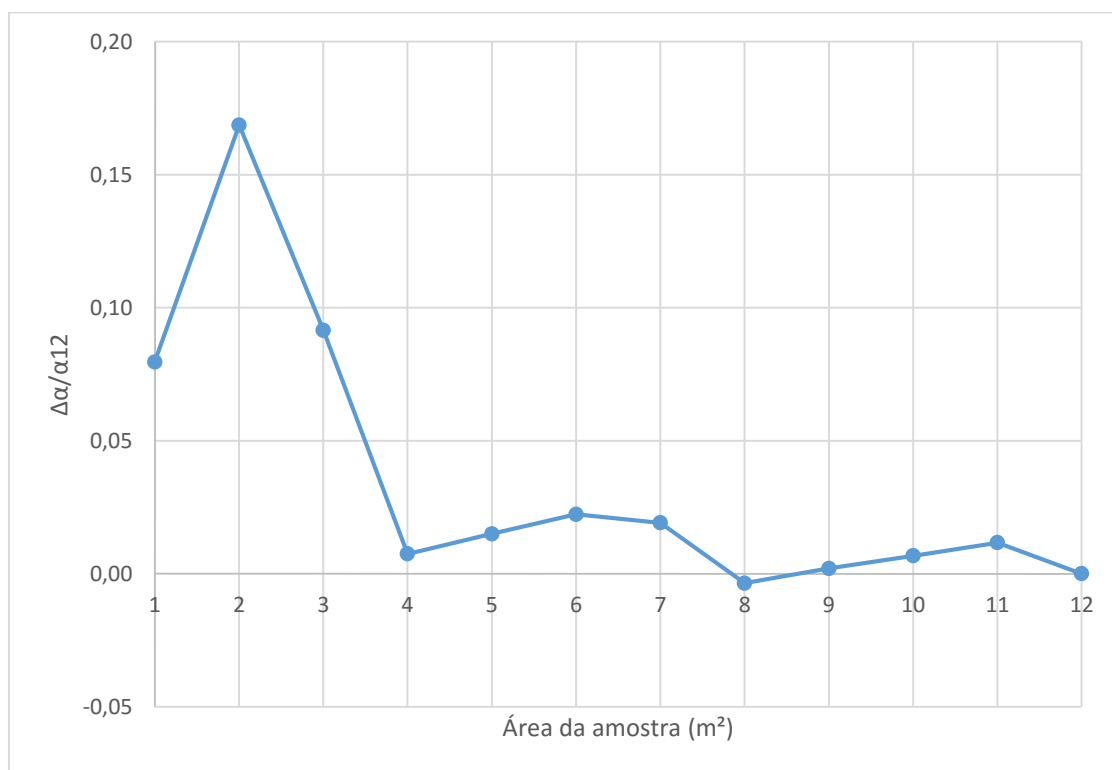


Fig. 5.15 – Variabilidade do  $\alpha_s$  face ao valor de referência ( $S=12 \text{ m}^2$ ) para a banda de frequência de 2000 Hz (1/3 oitava).

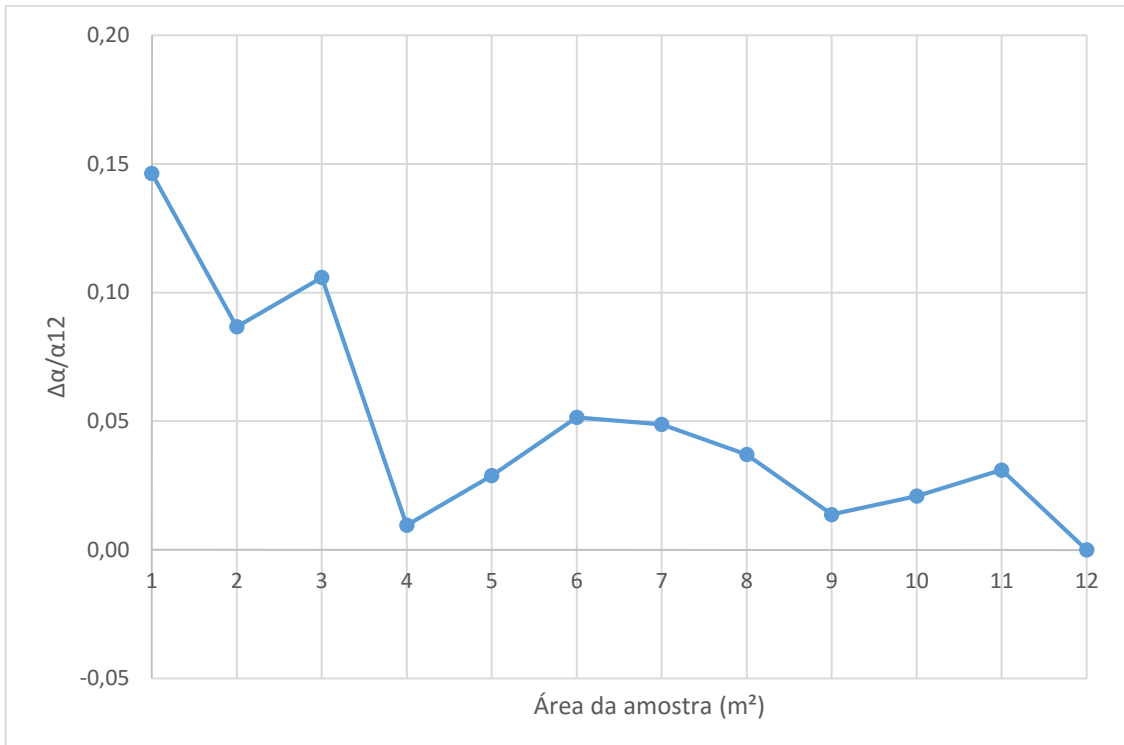


Fig. 5.16 – Variabilidade do  $\alpha_s$  face ao valor de referência ( $S=12 \text{ m}^2$ ) para a banda de frequência de 4000 Hz (1/3 oitava).

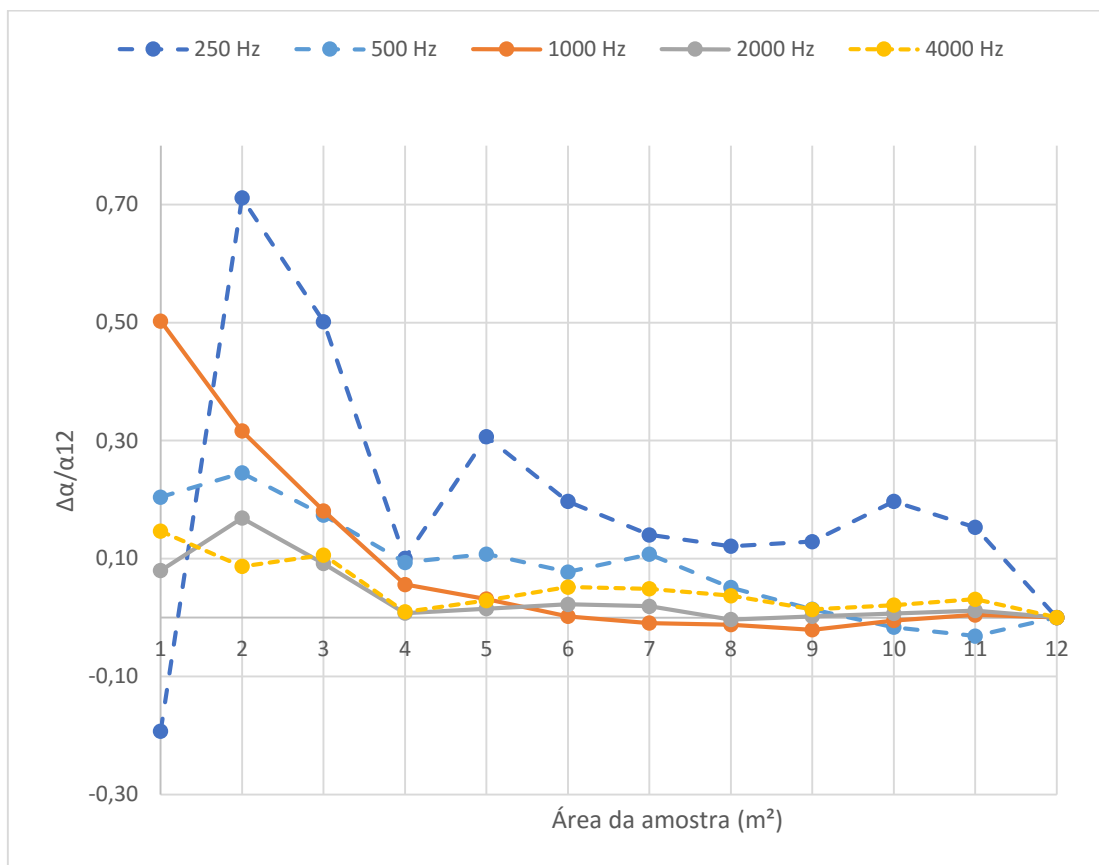


Fig. 5.17 – Variabilidade do  $\alpha_s$  face ao valor de referência ( $S=12 \text{ m}^2$ ) para as bandas de frequência de 250, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz (1/3 oitava).

Analisando os gráficos, verifica-se que onde existe maior variabilidade relativa de resultados é na banda de frequência dos 250 Hz e 1000 Hz, sendo que a partir dos 4 m<sup>2</sup> o valor do coeficiente de absorção se encontra no intervalo inferior a 10% do valor de  $\alpha_{12}$ . Nas restantes bandas de frequência representadas, o intervalo de confiança dos valores de  $\alpha_s$  encontra-se abaixo dos 10% para quase todas as áreas, verificando-se maior variabilidade para áreas inferiores a 4 m<sup>2</sup>. Perante os dados fornecidos, conclui-se que os resultados estarão entre as áreas de 4 e 5 m<sup>2</sup> para obtenção do coeficiente de absorção sonora mais próximo do valor de referência (12 m<sup>2</sup>). Posto isto, as figuras 5.18 e 5.19 mostram a variação do  $\alpha_s$  em relação à área de referência (S= 12 m<sup>2</sup>).

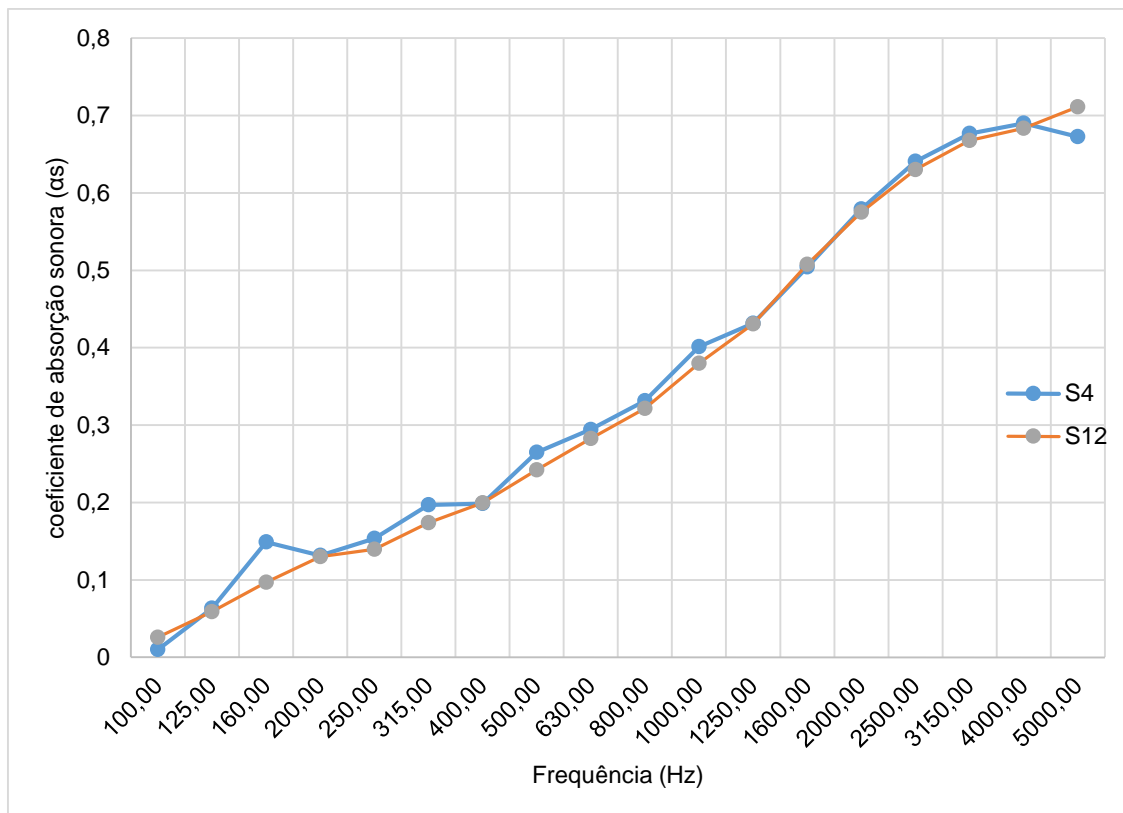


Fig. 5.18 – Evolução dos valores de  $\alpha_s$  para S4 e S12 em todas as frequências.

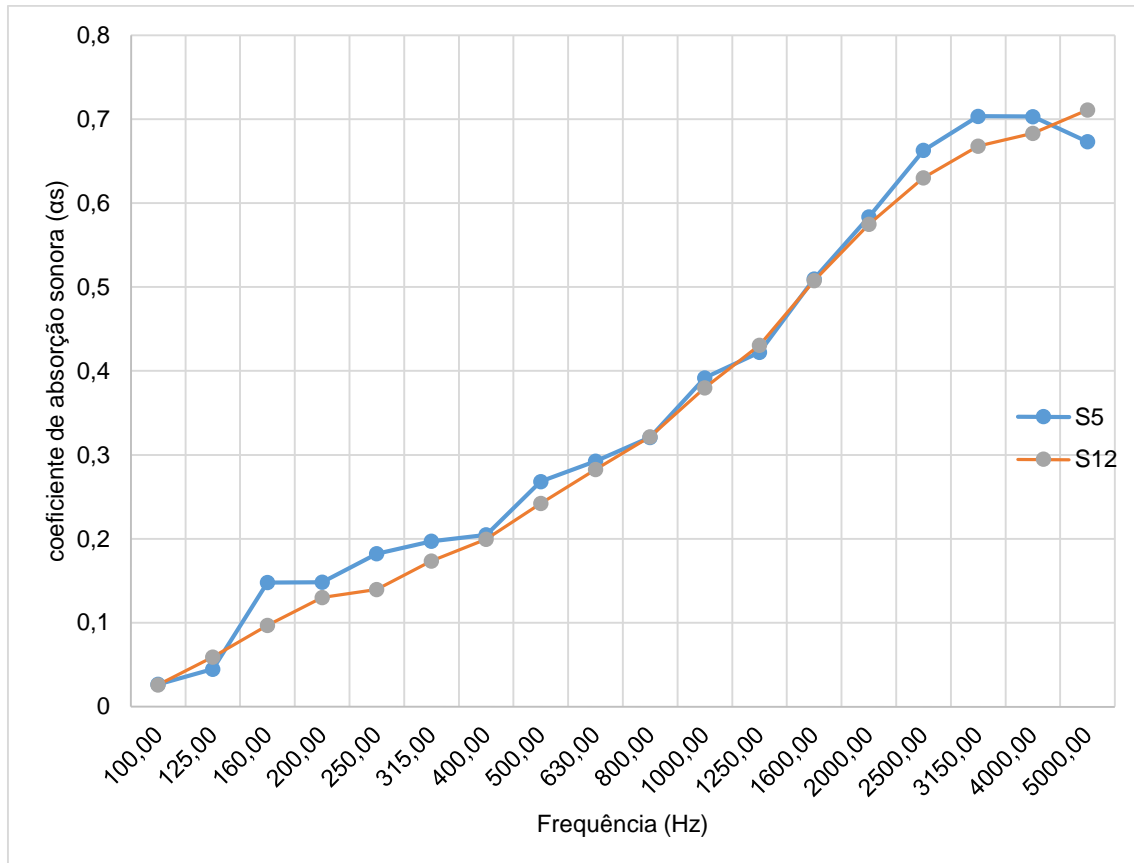


Fig. 5.19 – Evolução dos valores de  $\alpha_s$  para S5 e S12 em todas as frequências.

Analisando as figuras 5.18 e 5.19 conclui-se que para obtenção do coeficiente de absorção sonora é suficiente utilizar uma área de amostra de apenas 5 m<sup>2</sup>, visto que a variação do  $\alpha_s$  entre S5 (5 m<sup>2</sup>) e S12 (12 m<sup>2</sup>) é muito reduzida, sendo observado este facto na figura 5.19.

### 5.1.3. VARIAÇÃO DE $\alpha_s$ POR BANDA DE FREQUÊNCIA

Verificou-se o comportamento do  $\alpha_s$  por banda de frequência, de modo a perceber a variabilidade dos valores do coeficiente de absorção sonora com o aumento da área da amostra. A Fig. 5.20 ilustra essa variabilidade que permite uma análise mais concreta do comportamento em bandas de frequência (250, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz).

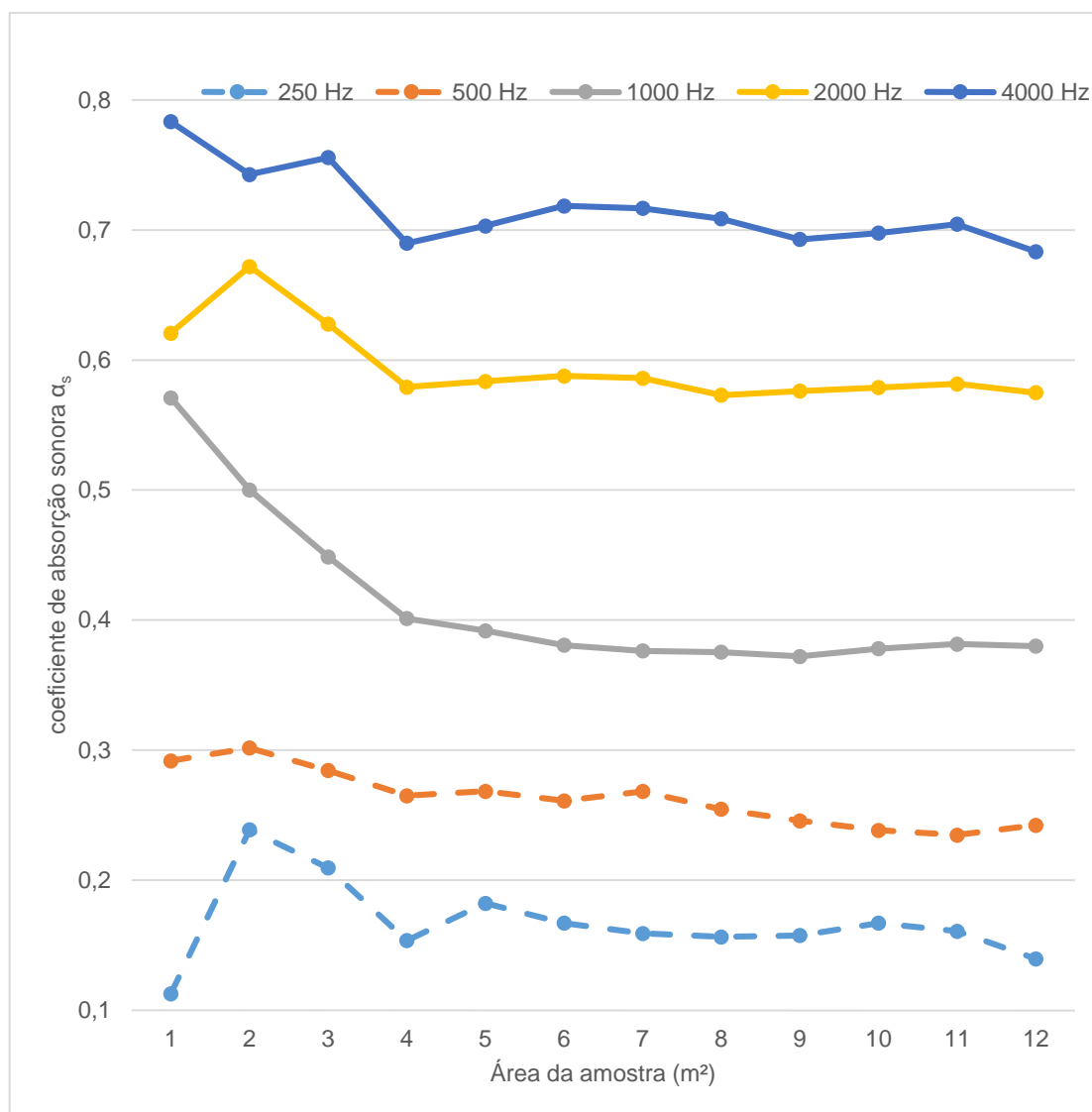


Fig. 5.20 – Variação de  $\alpha_s$  por banda de frequência, com o aumento da área da amostra (Si).

Observando a Fig. 5.20 verifica-se que há um decréscimo do valor de  $\alpha_s$  à medida que a área aumenta, sendo que a partir dos 5 m<sup>2</sup> o valor do coeficiente de absorção tem um comportamento mais ou menos constante para as cinco bandas de frequência representadas.

Verificando todas as condições testadas até aqui, conclui-se que a área de S5 é a configuração suficiente para determinar o coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante. Ou seja, é cerca de metade do tamanho mínimo exigido pela norma NP EN ISO 354 [1].

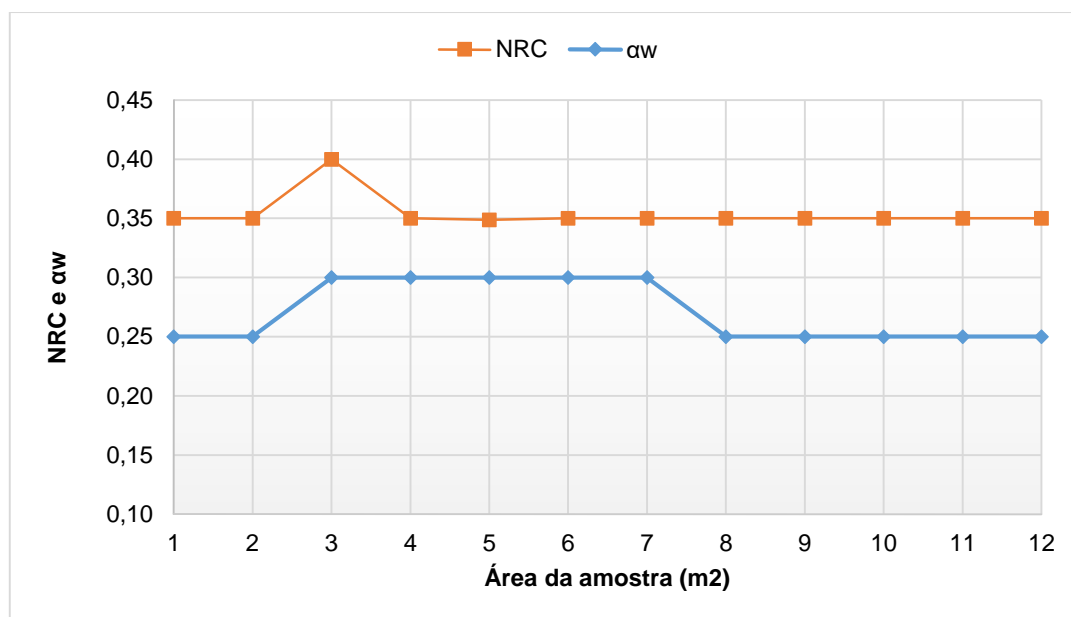
#### 5.1.4. VARIAÇÃO DE $\alpha_w$ E NRC EM FUNÇÃO DO TIPO DE AMOSTRA

É usual caracterizar um dado material com o parâmetro NRC (*Noise Reduction coefficient*) que se define pela média aritmética dos valores de  $\alpha$  nas bandas de oitava dos 250 aos 2000 Hz e também pelo parâmetro  $\alpha_w$  definido pelo ajuste ponderado dum curva de referência usando as bandas de oitava dos 250 aos 4000 Hz [3].

De seguida mostra-se no Quadro 5.9 e na Fig. 5.21 a variabilidade dos parâmetros com a variação da área da amostra.

Quadro 5.9 – Variação de  $\alpha_w$  e NRC em função da área da amostra (Si).

S (m <sup>2</sup> )	NRC	$\alpha_w$	Classe ( $\alpha_w$ )
1	0,35	0,25	E
2	0,35	0,25	E
3	0,40	0,30	D
4	0,35	0,30	D
5	0,35	0,30	D
6	0,35	0,30	D
7	0,35	0,30	D
8	0,35	0,25	E
9	0,35	0,25	E
10	0,35	0,25	E
11	0,35	0,25	E
12	0,35	0,25	E

Fig. 5.21 – Variação dos valores de NRC e  $\alpha_w$  em função da área da amostra.

Analisando a Fig. 5.21 repara-se um comportamento linear de ambos os parâmetros a partir dos 8 m<sup>2</sup>, sendo que NRC apenas apresenta um pequeno pico para a amostra S3 e todas as outras amostras têm o mesmo valor. Quanto a  $\alpha_w$  destaca-se o comportamento diferente para as amostras compreendidas entre 3 a 7 m<sup>2</sup>, o que leva concluir que realmente a área faz variar os resultados. Nesta análise em particular, concluir-se-ia que S8 é área mínima admissível, contudo, não se pode fazer conclusões desse tipo nesta análise uma vez que se trata de parâmetros que não são exatos, sendo valores ponderados e arredondados, traduzindo-se assim em valores iguais em amostras distintas. Importa apenas realçar a relevância destes mesmos na caracterização dos materiais.

Conclui-se também que, através de  $\alpha_w$  atribui-se ao material estudado uma classe de absorção sonora D para as áreas compreendidas entre 3 e 7 m<sup>2</sup>, estando todas as outras classificadas como classe E, ou seja, classe inferior.

## 5.2. ANÁLISE DO EFEITO DA DISPOSIÇÃO DA AMOSTRA NO ENSAIO EM CÂMARA REVERBERANTE

A disposição da amostra para o ensaio de determinação do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante é feita de acordo com a norma NP EN ISO 354 [1]. Ou seja, a amostra é colocada no centro da câmara reverberante, no piso.

A seguinte análise procurou testar qual o efeito dos valores de  $\alpha_s$  com a amostra disposta também espalhada pela câmara. Utilizou-se a área de amostra de 10 m<sup>2</sup>, (S10) e designa-se a amostra “espalhada” por S10 ESP.

O quadro de resultados é o representado no Quadro 5.10, e as Fig. 5.22 e 5.23 representam graficamente os valores do coeficiente de absorção nos dois tipos de configurações.

Quadro 5.10 – Coeficiente de absorção sonora ( $\alpha_s$ ) do ensaio realizado a S10 e S10 ESP (S=10 m<sup>2</sup>).

Frequência (Hz)	$\alpha_s$ (S10)	$\alpha_s$ (S10 ESP)	$\Delta\alpha$	$\Delta\alpha/\alpha_{10}$ (%)
100	0,01	0,02	0,02	100
125	0,05	0,06	0,01	42
160	0,10	0,13	0,03	35
200	0,09	0,15	0,06	69
250	0,17	0,20	0,03	18
315	0,16	0,20	0,04	24
400	0,20	0,21	0,01	9
500	0,24	0,26	0,02	10
630	0,28	0,32	0,04	14
800	0,32	0,36	0,04	11
1000	0,38	0,42	0,04	12
1250	0,43	0,49	0,06	15
1600	0,51	0,58	0,07	14
2000	0,58	0,64	0,06	10
2500	0,65	0,69	0,04	6
3150	0,69	0,71	0,02	4
4000	0,70	0,73	0,03	5
5000	0,69	0,73	0,04	6

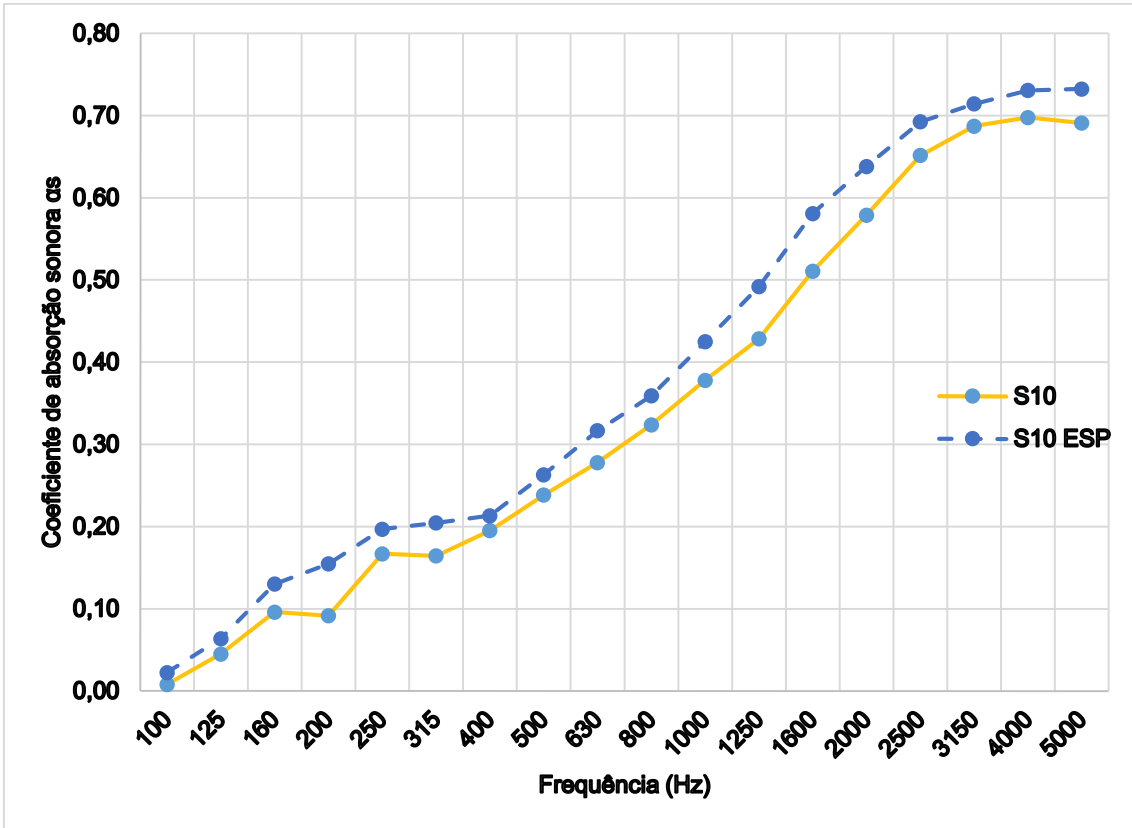


Fig. 5.22 - Evolução dos valores do coeficiente de absorção sonora para cada frequência nos casos de S10 e S10 ESP.

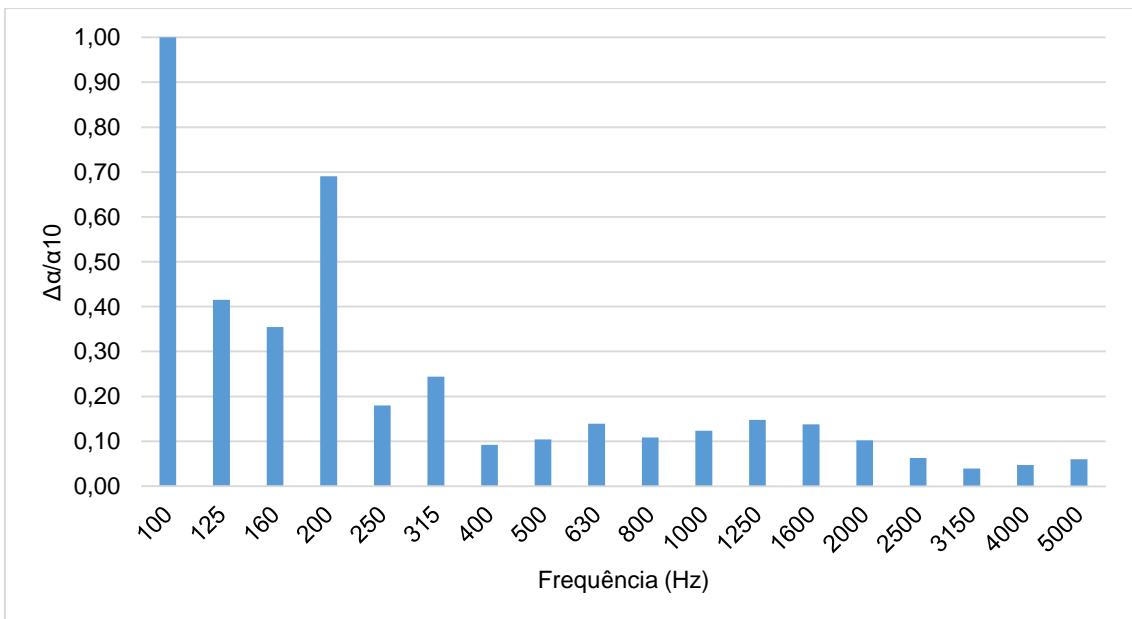


Fig. 5.23 – Variabilidade do  $\alpha_s$  face ao valor de referência S10 ( $S=10 \text{ m}^2$ ).

Analisando os dados fornecidos pelo Quadro 5.8 e pelas Fig. 5.22 e Fig. 5.23, há um acréscimo em todas as frequências do valor de  $\alpha_s$  quando a amostra está espalhada no piso da câmara reverberante. Verificando que a área é a mesma, o único parâmetro que pode influenciar neste acréscimo de valor é o aumento do perímetro, ou seja, o efeito de bordo. Este fenómeno foi explicado por Sauro *et al.* em 2009 [29], quando verificaram a importância do perímetro da

amostra na determinação do coeficiente de absorção sonora. Posto isto, verifica-se que ao espalhar a amostra pela sala, há um aumento dos valores do coeficiente de absorção sonora que pode ser devido ao aumento do perímetro da amostra, ao facto que a amostra ficar próxima da parede e diminuir a reflexão das ondas sonoras. Posto isto, conclui-se que é de real importância a disposição do material na sala para uma reprodutibilidade de resultados concretos, visto que numa variação da posição, há uma distorção muito grande de resultados.

Para um melhor entendimento do efeito do aumento da área, representa-se no Quadro 5.11 a variabilidade dos parâmetros NRC e  $\alpha_w$  para as duas combinações, S10 e S10 ESP. Neste caso há também um ganho no que diz respeito a estes dois parâmetros, o que demonstra a importância do perímetro na determinação do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante.

Quadro 5.11 – Variação dos parâmetros NRC e  $\alpha_w$  para S10 e S10 ESP.

<b>Tipo de amostra</b>	<b>NRC</b>	<b><math>\alpha_w</math></b>	<b>Classe (<math>\alpha_w</math>)</b>
S10	0,35	0,25 (M)	E
S10 ESP	0,40	0,30 (M)	D

# 6

## CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar o efeito da variação da área da amostra na determinação do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante. Para tal, foi utilizada a norma NP EN ISO 354 [1], na qual se fez variar a área e para um tipo de combinação, fez-se também variar a disposição da amostra no piso.

Hoje em dia obter amostras de materiais entre os 10 a 12 m<sup>2</sup> para determinação do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante pode ser um entrave muito grande, mas é o descrito pela norma NP EN ISO 354. Este trabalho demonstra que não é necessária uma amostra tão grande para o ensaio em câmara reverberante, e para demonstrar isso, comparou-se os  $\alpha_s$  de cada tipo de amostras (de 1 a 12 m<sup>2</sup>, com acréscimos de 1 em 1 m<sup>2</sup>) e os índices NRC e  $\alpha_w$  para um melhor entendimento da influência da área na variação nestes parâmetros.

Uma vez que os resultados obtidos têm de ter um meio de comparação, utilizou-se a amostra S10 (10 m<sup>2</sup>) para esse efeito, pois é o valor mínimo determinado pela norma NP EN ISO 354.

Os resultados obtidos para o parâmetro estudado ( $\alpha_s$ ) estão representados na Fig. 5.9 e fazendo uma análise detalhada, percebe-se que há maior variabilidade até à amostra S5 (5 m<sup>2</sup>) e à medida que a área da amostra aumenta, os valores do coeficiente de absorção sonora tendem a aproximar-se e a criar curvas muito idênticas.

Analisando a Fig. 5.20 denota-se uma linearidade de valores a partir da amostra de 5 m<sup>2</sup>, ou seja, metade do mínimo estipulado pela norma NP EN ISO 354.

Conclui-se que é suficiente uma amostra de 5 m<sup>2</sup> para a determinação credível do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante.

Durante o trabalho, também se estudou o efeito da disposição da amostra na obtenção de  $\alpha$  em câmara reverberante. Para tal, utilizou-se a amostra S10 (10 m<sup>2</sup>) e verificou-se a variabilidade dos resultados, comparando os parâmetros  $\alpha_s$ , NRC e  $\alpha_w$ .

Os resultados obtidos demonstram valores superiores em todos os parâmetros, na amostra espalhada (S10 ESP). Conclui-se que com a mesma área da amostra, mas perímetro superior há um ganho nos valores do coeficiente de absorção sonora, demonstrando que o efeito de bordo tem importância elevada na determinação do  $\alpha$  em câmara reverberante.

## 6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Apesar de ter sido feito um trabalho detalhado sobre os resultados obtidos a partir dos ensaios, por questões de tempo alguns aspetos foram deixados de parte. Mas, para uma análise futura serão enumerados aspetos que devem ser tidos em conta para a análise do coeficiente de absorção sonora.

Numa abordagem futura seria de importante relevância o estudo do comportamento do coeficiente de absorção sonora para a disposição do material na sala, uma vez que neste trabalho só se realizou para um tipo de amostra, 10 m<sup>2</sup>. A amostra como foi colocado no piso da câmara R1 por peças, tipo *puzzle*, havia aberturas entre uma manta e outra, também devido ao corte das amostras ter sido feito a mão livre, ao invés de ser com material adequado para tal precisão, o que leva a uma alteração da área da amostra. Ou seja, avaliar com formas de dispersão diferentes e consequentemente, perímetros diferentes.

Realizar um estudo semelhante, mas com materiais diferentes. Ou seja, utilizar materiais com absorção sonora muito mais elevada e muito menor, verificando a variabilidade de resultados, comparando com os apresentados neste trabalho.

Também seria importante estudar qual a quantidade necessária, e a sua disposição, de difusores dispostos na câmara reverberante, uma vez que no estudo realizado utilizou-se o campo difuso já criado na câmara R1. Ou seja, qual a quantidade de difusores mínimo necessários para a determinação do coeficiente de absorção sonora obtido em câmara reverberante.

Na determinação do coeficiente de absorção sonora, estes são os campos na qual podem ser feitos progressos para otimização de matéria prima e resultados que levam a conclusões precisas sobre o parâmetro estudado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NP EN ISO 354: 2007, Acústica. *Medição da absorção sonora em câmara reverberante.*
- [2] Propagação do som. <http://www.infoescola.com/fisica/ondas-longitudinais/>. Acedido em outubro de 2015.
- [3] Carvalho, A. P. O. Acústica Ambiental e de Edifícios, edição 8.8, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Setembro de 2014.
- [4] ISO 10534-1:1996, *Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 1: Method using standing wave ratio.*
- [5] Patrício, J. *Algumas considerações sobre a influência da transmissão marginal no valor do índice de isolamento sonoro a sons de impacto*, LNEC, Lisboa, 1999.
- [6] Difusão sonora. <http://audiodifusores.com/nhx.php>. Acedido em outubro de 2015.
- [7] Morse, P.M., Bolt, R.H. e Brown, R. L., *Acoustic Impedance and Sound Absorption*, Journal of the Acoustical Society of America, 1940, 12-2, 217-227.
- [8] Bolt, R.H., *On the Design of Perforated Facings for Acoustic Materials*, Journal of the Acoustical Society of America, 1947, 19, 917-921.
- [9] 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.
- [10] Kinsler, L.E. et al., *Fundamentals of Acoustics – Third Edition*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1982.
- [11] Sacerdote G.G. e Gigli, A., *Absorption of Sound by Resonant Panels*, J. Acoust. Soc. Am., 1951, Volume 23, Issue 3, pp. 349-352.
- [12] Ingard, K.U. e Bolt, R.H., *Absorption Characteristics of Acoustic Materials with Perforated Facings*, Journal of the Acoustical Society of America, 1951, 23, 533-540.
- [13] Beranek, L.L., *Acoustics*, McGraw-Hill, New York, 1954.
- [14] Silva, P.M., *Acústica de Edifícios*, LNEC, Lisboa, 1978.
- [15] Silva, P.M., *Condicionamento Acústico de Edifícios – Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros*, LNEC, Lisboa, 1984.
- [16] Meisser, M., *La Correction Acoustique des Locaux*, CATED, Paris, 1986.
- [17] Cox, T.J. e D'Antonio, P., *Acoustic Absorbers and Diffusers – Theory, Design and Application*, Spon Press, Londres, 2004.
- [18] Domingues, O., *A Acústica nos Edifícios – Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros*, LNEC, Lisboa, 2005.
- [19] Schroeder, M. R., *Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: more lateral sound diffusion*, Journal of the Acoustical Society of America, 65, 1979, 958–963.
- [20] Difusor de Schoeder. [http://www.acoustic.ua/forms/SchDiff\\_out.html](http://www.acoustic.ua/forms/SchDiff_out.html). Acedido em dezembro de 2015
- [21] David T. Bradley, *Effect of boundary diffusers in a reverberation chamber: Standardized diffuse field quantifiers*, J. Acoust. Soc. Am. 135 (4), abril 2014
- [22] ASTM C423: 1984. “Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method”

- [23] Bartel, Thomas W., *Effect of absorber geometry on apparent absorption coefficients as measured in a reverberation chamber*, Washington DC, 1981
- [24] ANSI/ASTM C 423-77, *Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method*, Am. Soc. Test. Mater., Filadelfia 1977.
- [25] Northwood T. D., *Absorption of Diffuse Sound by a Strip or Rectangular Patch of Absorptive Material*, J. Acoust. Soc. Am. 35, 1173-1177, 1963.
- [26] Kimura, Kazunori e Yamamoto, Kohei, *The required sample size in measuring oblique incidence absorption coefficient Experimental study*, Toquio, Japão, 2001.
- [27] Izewska, A., *Measurement uncertainty of the sound absorption coefficient*, Poland, 2008.
- [28] ISO 9631-1:1993, “*Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*”.
- [29] Sauro, Ronald., Vargas, Michael. e Mange, Garay. *Absorption coefficients-part 1: is square area enough?* Agosto de 2009.
- [30] ISO-17497-1, “*Acoustics-Sound-scattering properties of surfaces-Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room*”.
- [31] EN ISO 11654: 1997, *Acoustics. “Sound absorbers for use in buildings – Rating of sound absorption”*.