



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **Estudo de Propriedades Acústicas de Materiais Porosos**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções

Autor

**Joana Rita Teixeira Bento**

Orientadores

**Professor Doutor António Tadeu**

**Professora Doutora Julieta António**

**Colaboração Institucional**



Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, Julho, 2016**

## AGRADECIMENTOS

Na elaboração desta dissertação contei com o apoio de muita gente. Agradeço à ajuda que tive durante a realização dos ensaios no ITeCons, principalmente à Sofia.

Ao longo do semestre houve contratempos mas, com a motivação dos colegas, amigos, familiares e de Deus, foi possível contorná-los mais facilmente.

Agradeço à Professora Doutora Julieta António que me acompanhou durante todo o semestre e me orientou da melhor maneira possível.

Ao meu melhor amigo, Fernando, que mais uma vez mostrou amizade honesta e sincera, sem ele acredito que não teria tanta força e empenho em acabar esta dissertação com o devido valor.

Aos meus amigos, que se disponibilizaram para ajudar no que fosse preciso. À atenção e encorajamento deles para me manter focada e dedicada.

Um agradecimento carinhoso irá para a minha família, que me tem apoiado e acompanhado incansavelmente, não só durante a realização da tese, mas ao longo de todo o meu percurso académico.

*“O justo se alegrará no Senhor, e confiará nele, e todos os retos de coração se gloriarão.”*

Salmos 64:10-10

## RESUMO

Os requisitos relativos ao conforto no interior dos edifícios são cada vez maiores quer pelas exigências requeridas pelos seus ocupantes, quer pelas imposições da legislação. De entre os parâmetros de conforto que são avaliados, encontra-se o comportamento acústico dos edifícios. Os materiais e as técnicas construtivas utilizados na construção dos edifícios têm uma influência enorme no comportamento dos mesmos. Os materiais porosos são bastante utilizados para aplicações acústicas nos edifícios. Podem ser aplicados à vista ou no tardo de painéis perfurados ou ranhurados para contribuir para a absorção sonora no interior do espaço (diminuição do tempo de reverberação). Estes materiais podem ser aplicados nas caixas de ar de paredes duplas para melhorar o isolamento sonoro a sons aéreos, atenuando as quebras de isolamento devidas às ressonâncias da caixa de ar da parede. Os materiais porosos são também eficazes na atenuação de sons de percussão quando aplicados em pavimentos flutuantes (sob lajetas de betão ou sob revestimentos). Neste trabalho selecionaram-se alguns materiais porosos e determinaram-se experimentalmente propriedades tais como a absorção sonora, a rigidez dinâmica e a resistividade ao fluxo de ar. A determinação da resistividade ao fluxo de ar dos materiais também permitiu perceber se a rigidez dinâmica do material necessita de ser corrigida com a rigidez do ar contido nos poros. Alguns materiais foram ensaiados após terem sido carregados durante alguns dias, para verificar o efeito da aplicação de uma carga estática nas suas propriedades. Finalmente verificou-se se era possível estabelecer alguma correlação entre as propriedades determinadas.

## ABSTRACT

Comfort requirements inside buildings are increasing owing the demands required by its occupants, and because impositions of legislation. Among the comfort parameters which are evaluated is the acoustic behavior of buildings. The materials and construction techniques used in the construction of the buildings have a huge influence on the behavior of themselves. Porous materials are widely used for acoustic applications in buildings. They can be applied as final covering or in the back of perforated or slotted panels to contribute to the sound absorption within the space (decrease of reverberation time). These materials may be applied in air-cavities of double walls to improve the airborne sound insulation by attenuating de sound insulation decrease due to resonances inside the wall air-cavity. Porous materials are also effective in the attenuation of impact sounds when applied in floating floors (under floating concrete slabs or floor coverings). In this work some porous materials have been selected and properties such as sound absorption, the dynamic stiffness and air flow resistivity have been determined experimentally. The determination of the air flow resistivity of the material also allowed to verify if the apparent dynamic stiffness of the material needs to be corrected with the dynamic stiffness of the enclosed air contained in the pores. Some materials were tested after being loaded for a few days, to check the effect on their properties of applying a static load. Finally it has been assessed if it was possible to establish a correlation between the properties evaluated.

---

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
ÍNDICE DE QUADROS .....	viii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Estrutura da Dissertação .....	2
2 MATERIAIS POROSOS .....	3
2.1 Tipo de Materiais Porosos .....	3
2.2 Aplicações dos Materiais Porosos .....	5
2.3 Propriedades dos Materiais Porosos .....	5
2.3.1 Absorção Sonora .....	5
2.3.2 Massa volúmica .....	7
2.3.3 Espessura .....	7
2.3.4 Porosidade .....	8
2.3.5 Tortuosidade .....	9
2.3.6 Rigidez Dinâmica .....	9
2.3.7 Resistividade ao Fluxo de Ar .....	9
2.5 Alguns Estudos .....	10
3 AMOSTRAS E PROCEDIMENTO LABORATORIAL .....	13
3.1 Amostras .....	13
3.2 Procedimento Laboratorial .....	17
3.2.1 Procedimento Experimental do Ensaio da Rigidez Dinâmica.....	17
3.2.2 Procedimento Experimental do Ensaio da Resistividade ao Fluxo de Ar .....	20
3.2.3 Procedimento Experimental do Ensaio para a determinação do Coeficiente de Absorção Sonora em Tubo de Impedância.....	22
3.2.4 Carregamento das Amostras .....	24
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	25
4.1 Resultados do Ensaio da Rigidez Dinâmica .....	25

---

4.2	Resultados do Ensaio da Resistividade ao Fluxo de Ar.....	29
4.3	Resultados do Ensaio para determinação do Coeficiente de Absorção Sonora em Tubo de Impedância.....	33
4.4	Correlação das Amostras com os Ensaios .....	37
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	40
5.1	Conclusões .....	40
5.2	Trabalhos futuros .....	41
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	42

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração de materiais celulares, fibrosos e granulares (adaptado de Arenas e Crocker). .....	4
Figura 2 – Esquema de som incidente, refletido e refratado (adaptado de Caetano). .....	6
Figura 3 – Processo de absorção sonora em material poroso (adaptado de Moreira). .....	8
Figura 4 – Espuma resultante da aglomeração de espuma flexível de poliuretano (Aglomex). 14	
Figura 5 – Espuma de resina de melamina (Basotect).....	14
Figura 6 – Fibra de Coco. ....	14
Figura 7 – Lã de Vidro em Painel. ....	15
Figura 8 – Fibras de Poliéster. ....	15
Figura 9 – Esquema de preparação do ensaio para determinar a rigidez dinâmica (adaptado de Marcolino et al, 2015).....	18
Figura 10 – Excitação do provete. ....	19
Figura 11 – Equipamento do ensaio da resistividade ao fluxo de ar. ....	20
Figura 12 – Tubo de impedância. ....	23
Figura 13 – Frequência de ressonância e amplitude no ponto máximo num ponto de excitação do provete. ....	25
Figura 14 – Resistividade ao fluxo de ar em função da velocidade do fluxo de ar (mm/s). ...	30
Figura 15 – Coeficientes de absorção sonora em função da frequência para todas as amostras. 34	
Figura 16 – Coeficientes de absorção sonora em função da frequência para todas as amostras com carregamento.....	36
Figura 17 – Correlação de todas as amostras com a rigidez dinâmica aparente, resistividade ao fluxo de ar e coeficiente de absorção sonora. ....	38



---

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Espessuras dos provetes de cada amostra. ....	16
Quadro 2 – Massa volúmica aparente de todas as amostras. ....	16
Quadro 3 – Materiais submetidos a carregamento. ....	24
Quadro 4 – Frequência de ressonância e amplitude no ponto máximo. ....	26
Quadro 5 – Rigidez dinâmica aparente para as espessuras de 10 mm e 20 mm de espuma de poliuretano. ....	26
Quadro 6 – Rigidez dinâmica aparente para as espessuras de 20 mm e 30 mm de espuma de melamina. ....	27
Quadro 7 – Rigidez dinâmica aparente sem e com carregamento para as espessuras de 10 mm e 20 mm de fibra de coco. ....	27
Quadro 8 – Rigidez dinâmica aparente para a espessura de 15 mm da lã de vidro em painel. ....	28
Quadro 9 – Rigidez dinâmica aparente para a espessura de 5 mm e de 6 mm da fibra de poliéster. ....	29
Quadro 10 – Resistividade ao fluxo de ar para as espessuras de 10 mm e 20 mm da espuma de poliuretano. ....	30
Quadro 11 – Resistividade ao fluxo de ar para as espessuras de 20 mm e 30 mm da espuma de melamina. ....	31
Quadro 12 – Resistividade ao fluxo de ar para as espessuras de 10 mm e 20 mm da fibra de coco. ....	32
Quadro 13 – Resistividade ao fluxo de ar para a espessura de 15 mm da lã em painel. ....	32
Quadro 14 – Resistividade ao fluxo de ar para as espessuras de 5 mm e 6 mm da fibra de poliéster. ....	33
Quadro 15 – Coeficiente de absorção sonora máximo para todas as amostras em função da frequência. ....	35
Quadro 16 – Coeficiente de absorção sonora máximo com e sem carregamento em função da frequência. ....	37
Quadro 17 – Rigidez dinâmica aparente, resistividade ao fluxo de ar e coeficiente de absorção sonora sem carregamento de todas as amostras. ....	38

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

Cada vez mais há uma maior preocupação no que diz respeito ao isolamento em habitações, tanto térmico como acústico, de forma a garantir um melhor conforto e qualidade de vida dos ocupantes. As exigências crescentes por parte dos utilizadores, fazem com que haja uma maior preocupação sobre a escolha e a aplicação correta e eficaz destes isolamentos. Um bom isolamento acústico nas habitações permite uma maior comodidade, qualidade, segurança e saúde desfrutada pelos ocupantes. Entende-se por uma boa acústica, quando todo ou quase todo o ruído inoportuno é atenuado – não prejudica o bom desempenho funcional do local a ser usado.

Os materiais leves e porosos, normalmente ajudam a atenuar o ruído. Um bom conhecimento das propriedades acústicas de tais materiais permite realizar um bom projeto que reúne condições acusticamente favoráveis.

O desempenho acústico dos materiais depende das suas propriedades. Por exemplo, a absorção sonora e a transmissão sonora através dos materiais porosos é, em parte, descrita pela sua capacidade de resistir à passagem do ar. Esta propriedade é quantificada pela resistividade ao fluxo de ar.

A atenuação de sons de percussão provocada por materiais porosos, ou outros, depende de sua rigidez dinâmica. É frequente usar a rigidez dinâmica dos materiais para prever a redução da transmissão de sons de percussão  $\Delta L$  e para comparar o desempenho de produtos.

A rigidez dinâmica depende da rigidez da estrutura do material e da rigidez do ar contido nos poros. A determinação da rigidez dinâmica em laboratório faz-se em amostras de pequena dimensão e o ar contido nos poros pode assim entrar e sair mais facilmente durante o ensaio do que em amostras de maiores dimensões. Por esse motivo, a rigidez dinâmica é subestimada e é necessário corrigir o resultado obtido para ter em conta a contribuição da rigidez do ar contida nos poros.

A norma de ensaio para a determinação da rigidez dinâmica apresenta, um procedimento aproximado dependente da resistividade ao fluxo de ar do material. Para resistividades ao fluxo de ar na direção lateral entre  $10 \text{ kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  e  $100 \text{ kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ , a rigidez dinâmica do ar contido nos poros é calculada em função da espessura do material e da sua porosidade.

Uma vez que o comportamento acústico dos materiais porosos depende destas propriedades, considerou-se que seria interessante seleccionar alguns materiais e analisar a relação entre essas propriedades, nomeadamente a absorção sonora, resistividade ao fluxo de ar, e rigidez dinâmica.

Esta dissertação tem como objetivo ensaiar as diferentes amostras de materiais porosos de modo a avaliar as suas propriedades acústicas e relacioná-las entre si.

## **1.2 Estrutura da Dissertação**

No capítulo 1 encontra-se o enquadramento e a estrutura desta dissertação.

No capítulo 2 explica-se com algum detalhe os tipos, propriedades e alguns estudos de materiais porosos.

No capítulo 3 descrevem-se pormenorizadamente as amostras e o procedimento laboratorial dos ensaios realizados.

No capítulo 4 encontra-se a análise de resultados dos ensaios laboratoriais.

No capítulo 5 tem-se a conclusão desta dissertação e trabalhos futuros.

No capítulo 6 é onde se encontram as referências bibliográficas usadas para a elaboração desta dissertação.

## 2 MATERIAIS POROSOS

### 2.1 Tipo de Materiais Porosos

Os materiais porosos são conhecidos pelo seu uso no controlo de ruído devido ao seu fácil uso, boas propriedades acústicas e não necessitam de entrada de energia extra (Liu, Zan et al, 2016). Existe uma gama enorme de materiais porosos e podem ser classificados como fibrosos, celulares ou granulares. A configuração microscópica é que os distingue. Os materiais constituídos por células abertas como poliuretano, espumas e cortiças são exemplos de materiais celulares.

Os materiais fibrosos consistem numa série de aberturas em túnel que são formadas nos interstícios das fibras. Os materiais fibrosos podem ser naturais ou sintéticos. As fibras naturais podem ser de origem vegetal (algodão, “kenaf”, cânhamo, madeira, fibra de coco etc.), de origem animal (lã de ovelha) ou de origem mineral (amianto). As fibras sintéticas também podem ser minerais (fibra de vidro, lã de vidro, lã de rocha, grafite, cerâmica etc.) ou polímeros (poliéster, polipropileno, “kevlar” (fibra sintética de aramida), etc.). Os materiais fibrosos sintéticos são utilizados principalmente para a absorção acústica e isolamento térmico. Mas, como são feitas a partir de processos industriais baseados em produtos químicos sintéticos, tem sido dada uma maior atenção para o uso de fibras naturais para a absorção do som. As fibras naturais são totalmente biodegradáveis, com mais baixo custo no processo de fabrico e mais amigáveis ambientalmente. O diâmetro microscópico da fibra é um parâmetro importante na absorção sonora. Em geral, as fibras naturais possuem formas mais irregulares e diâmetros maiores com secções variáveis em comparação com as fibras sintéticas.

Os materiais granulares apresentam um corpo macroscópico relativamente rígido com dimensão maior que a dos vazios internos. Asfalto, betão poroso, argilas granulares, areias e cascalho são alguns exemplos de materiais granulares. Os poros fechados são

consideravelmente menos eficientes que os poros abertos para absorver a energia do som (Arenas e Crocker, 2010). Na figura 1 estão representados os três principais tipos de materiais porosos,

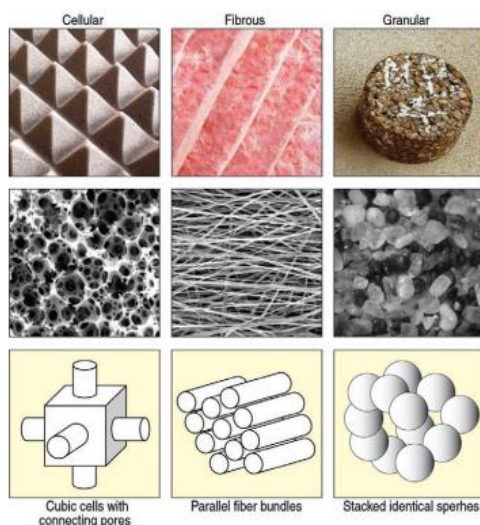


Figura 1 – Configuração de materiais celulares, fibrosos e granulares (adaptado de Arenas e Crocker).

Para a elaboração do estudo da presente dissertação, foram selecionados cinco tipos de materiais porosos para os quais serão estudadas algumas propriedades acústicas. Espuma resultante da aglomeração de espuma flexível de poliuretano (Aglomex) e espuma de resina de melamina (basotect), fibra de coco, lã de vidro em painel e fibras de poliéster foram os materiais submetidos a ensaios. No capítulo 3 e 4 apresentam-se, em maior detalhe, as amostras ensaiadas e os resultados obtidos.

## 2.2 Aplicações dos Materiais Porosos

Os aglomerados de cortiça são comuns em revestimentos de pisos, paredes, isolamento térmico e acústico, juntas de dilatação entre elementos rígidos, mantas anti vibráteis especialmente para as altas frequências e também podem ser aplicados como amortecedores das vibrações no suporte das máquinas. A lã de rocha é um produto de excelência para o isolamento a nível térmico e acústico, por exemplo, isolamento de caixa-de-ar, de cobertura, de piso com pavimento flutuante, de paredes divisórias interiores, de fachada com o exterior e de laje de esteira (sótão não aproveitado). O uso de espuma resultante da aglomeração de espuma flexível de poliuretano (Aglomex) pode aumentar muito o isolamento, tanto a sons de percussão como a sons aéreos. A espuma de resina de melamina (basotect) é ótima para a aplicação de isolamento em tetos falsos, condutas de ar condicionado, ventiladores, etc. Já, a fibra de coco é aplicado como isolante a sons de percussão em pavimentos, barreiras acústicas, corta-ventos. A lã de vidro em painel é recomendável, sendo um material não inflamável, para a aplicação em zonas propícias a temperaturas elevadas, como por exemplo, caldeiras, fornos, turbinas, etc. Por fim, as fibras de poliéster é comum serem usadas na construção como isolamentos acústicos e térmico.

## 2.3 Propriedades dos Materiais Porosos

### 2.3.1 Absorção Sonora

Para que os ocupantes dum espaço fechado sintam conforto acústico, é necessário que o espaço possua um tempo de reverberação adequado (tempo que o nível sonoro demora a diminuir 60 dB, se a fonte for bruscamente interrompida). Os materiais leves e porosos apresentam uma boa capacidade de absorção sonora, contribuindo para a diminuição do tempo de reverberação.

A energia que uma onda sonora transporta, ao embater num objeto e/ou obstáculo, pode ser dividida em três partes:

- Parte refletida – o ângulo de incidência é igual ao ângulo refletido (em fluidos).
- Parte absorvida – é dissipada em deformações elásticas do próprio material.
- Parte transmitida/refratada – à energia absorvida pelo material, mas que não foi dissipada, passa para o outro meio.

O esquema da figura 2 mostra os fenómenos descritos:

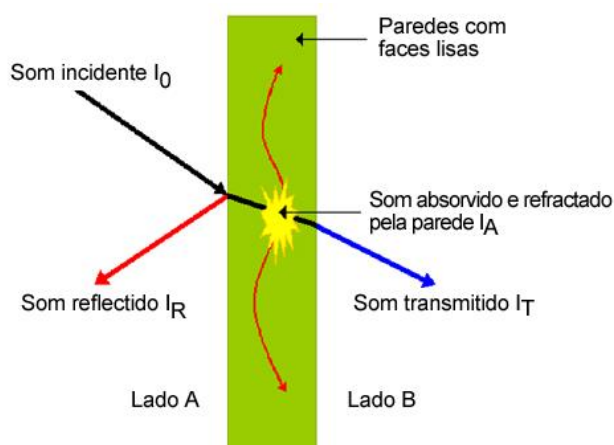


Figura 2 – Esquema de som incidente, refletido e refratado (adaptado de Caetano).

Se a energia absorvida é dissipada em deformações elásticas do material, então quanto menos densos, menos rígidos forem os materiais, com menos superfícies lisa, melhor será o seu comportamento de absorção ao som.

O coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) de um material é a razão entre a quantidade de energia sonora absorvida pelo material, e a energia nele incidente.

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad (1)$$

onde,

$E_a$  – Energia absorvida pelo material

$E_i$  – Energia incidente sobre o material

O coeficiente de absorção sonora está compreendido entre 0 e 1 e varia com a frequência do som. Um material que tenha um coeficiente de absorção sonora, por exemplo 0,3, quer dizer que absorve 30% e reflete 70%, da energia sonora incidente.

Para facilitar a compreensão,

- Coeficiente de absorção sonora, 0 – Reflete 100%
- Coeficiente de absorção sonora, 1 – Absorve 100%

Um material é considerado absorvente, quando o seu coeficiente de absorção é igual ou superior a 0,5 ou seja, absorve pelo menos 50% da onda sonora incidente.

### 2.3.2 Massa volúmica

A massa volúmica é uma propriedade relevante tanto nos sólidos, como nos materiais porosos, pois nestes últimos o ar contido nos poros tem influência na sua densidade. A massa volúmica de um material é obtida pela razão entre a sua massa e o respetivo volume. Materiais porosos possuem uma massa volúmica relativamente baixa que varia entre  $130\text{kg}/\text{m}^3$  e  $165\text{kg}/\text{m}^3$ , o que contribui para a leveza do material. É expectável que haja relação proporcional entre a massa volúmica e a absorção sonora, dum dado material poroso (Silva, 1983).

### 2.3.3 Espessura

Verifica-se que com o aumento da espessura, costuma existir um aumento da absorção sonora, nas baixas frequências, não tendo tanta relevância nas frequências altas (Domingues, 2005).



### 2.3.4 Porosidade

Esta propriedade tal como o nome sugere, é a mais básica de um material poroso.

A porosidade dos materiais é definida pelo volume de espaços abertos que podem ou não estar em contacto entre si ocupando a maior parte do volume total do material. Estes interstícios asseguram a permeabilidade e propagação de ondas sonoras de frequências altas. O ar contido nesses poros ao vibrar entra, em contacto com as paredes sólidas e é devido ao atrito que se faz sentir, que a energia sonora é transformada em energia térmica (Domingues, 2005).

A figura 3 apresenta um esquema do processo descrito,

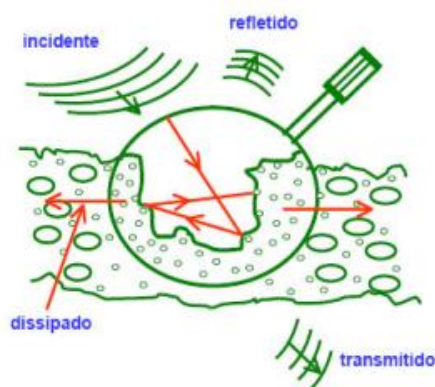


Figura 3 – Processo de absorção sonora em material poroso (adaptado de Moreira).

A porosidade é dada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{V_e}{V_T} \quad (2)$$

Onde,

$V_e$  – Volume de espaços vazios

$V_T$  – Volume total

### **2.3.5 Tortuosidade**

A tortuosidade é uma propriedade física de extrema importância para a caracterização acústica dum dado material poroso. Esta propriedade tem como definição, a não-uniformidade da secção transversal dos poros, ao longo do comprimento do material poroso, o que influencia diretamente a velocidade da propagação das ondas sonoras e o coeficiente de reflexão, em frequências altas. Pode ser estimada através de medições de transmissão e reflexão. A tortuosidade depende de dois fatores: mudança na direção do ar (à medida que o ar é restringido ao longo do percurso dos poros tortuosos, gera força nas paredes das partículas sólidas, e em consequência estas criam uma força correspondente de reação) e forças de interação viscosa (são forças que contêm uma componente resistiva e reativa, produzindo uma restrição ao longo do caminho, aumentando a energia cinética do fluxo de ar) (Mafra et al 2005).

### **2.3.6 Rigidez Dinâmica**

Uma das propriedades fundamentais dos materiais para serem utilizados na redução do nível sonoro a sons de percussão, é rigidez dinâmica baixa, por unidade de área. Essa propriedade será avaliada em materiais porosos ensaiados no âmbito desta dissertação. Note-se que: quanto menor o valor da rigidez dinâmica, maior será a sua capacidade de atenuação a sons de impacto. Logo, maior será a redução sonora (dB). O uso de materiais porosos, como camada resiliente que separa a lajeta flutuante da base estrutural do pavimento, pode ser uma boa solução construtiva para a atenuação a sons de percussão (Neves, et al, 2008).

### **2.3.7 Resistividade ao Fluxo de Ar**

A resistividade ao fluxo de ar dos materiais é um parâmetro importante quando o objetivo é a atenuação de ondas sonoras.

O facto de os materiais serem porosos, facilita a passagem de ar no seu interior e, a dissipação sonora ocorre devido ao atrito existente entre o ar contido nos poros abertos e a parte sólida. O atrito que se faz sentir entre o ar nos poros com secção pequena, e a parte sólida do material,

pode estar relacionado com alta resistividade ao fluxo de ar. O contrário também é válido – poros com grande secção, podem ter baixa resistividade ao fluxo de ar e, portanto, menor atrito.

## 2.5 Alguns Estudos

Os materiais porosos são muito usados para aplicações no âmbito da acústica, assim como para outras áreas. De seguida, irei descrever alguns trabalhos já realizados com os materiais porosos. Nos últimos anos, as fibras naturais têm vindo a ser analisadas e consideradas boas soluções, por exemplo, para a construção de painéis de absorção do som a baixo custo.

Na Malásia, um dos estudos realizados foi o seguinte: fibras da casca de coco fresco do mercado e fibras de coco industrial misturadas com aglutinante foram submetidas a ensaios de tubo de impedância, com o objetivo de determinar o coeficiente de absorção sonora. As primeiras fibras, com 20mm de espessura, obtiveram um coeficiente de absorção 0,8 para  $f > 1360\text{Hz}$ . Com o aumento da espessura para o dobro, obteve-se o mesmo coeficiente, mas desta vez, para baixas frequências,  $f > 578\text{ Hz}$ . Nas fibras de coco industrial concluiu-se que têm má absorção acústica em baixas frequências. Algumas das soluções para melhorar propriedades como a rigidez e a inflamabilidade, foram a mistura de aditivos e/ou uso de placa perfurada (Fouladia et al, 2010).

Num artigo realizado na Universidade da Malásia, foi discutida a utilização de fibras naturais a partir de resíduos de cana de açúcar, para um possível material acústico. O bom desempenho acústico das fibras encontrou-se para frequências entre 1,2 – 4,5 kHz e o coeficiente de absorção teve uma média de 0,65 (Putra et al, 2013).

Num outro artigo, (Patnik et al, 2015), ensaiaram e compararam os resultados de três amostras. Uma das amostras foi a utilização de 100% de fibras de resíduos de lã de ovelha, a outra amostra consistia na mistura de 50% de fibras de poliéster reciclado com 50% de fibras de resíduos de lã de ovelha e a terceira amostra foi preparada com 100% de fibras de poliéster reciclado. Todas as amostras foram testadas para isolamento térmico, acústico, absorção de humidade, resistência ao fogo e biodegradabilidade. A amostra resultante da mistura de 50% de ambas as fibras foi a que apresentou melhores propriedades de isolamento acústico, absorção da

humidade, resistência ao fogo, boa resistência para condições de alta humidade sem afetar as propriedades acústicas e atingiu 65-70% de biodegradabilidade.

Num outro estudo feito, na Universidade de Ryerson no Canadá, a escolha das fibras de materiais naturais para a determinação do coeficiente de absorção e resistividade ao fluxo de ar foram: “kenaf”, madeira, cânhamo, coco, cortiça, cana, papelão e lã de ovelha e todas as amostras foram ensaiadas com diferentes espessuras.

Dentro destes materiais, realçaram-se as fibras de coco e a lã de ovelha com resultados muito promissores em relação à absorção sonora (Berardi e Iannace, 2015).

Na Universidade de Bolonha, Massimo Garai e Francesco Pompoli (2005) desenvolveram um modelo empírico para prever a resistividade ao fluxo de ar, impedância acústica e coeficiente de absorção das fibras de poliéster. O objetivo era comparar os resultados calculados com os obtidos através do método de tubo de impedância ISO 10534-2 e do método de resposta ao impulso de campo livre ISO 10534-1. As amostras medidas tinham diferentes densidades, espessuras e diâmetros compreendidos entre 18 e 48 mm. Os resultados foram conclusivos, ou seja, o novo modelo desenvolvido pode prever as propriedades acústicas em fibras de poliéster, independentemente das combinações possíveis entre espessura e densidade.

Na Universidade Donghu, na China, tiveram a ideia de criar novos compósitos leves e finos resultantes da mistura de polietileno clorado e fibras de poliéster ocas, com intuito de determinar a absorção sonora. Os compósitos foram testados num tubo de impedância, e a absorção sonora aumentou significativamente com o aumento de teor em fibras de poliéster ocas. Compósitos com 20% de concentração de fibras de poliéster ocas e 1 mm de espessura, aumentam o coeficiente de absorção, tomando o valor de 0,42 a 2500 Hz. Quando a espessura do compósito é aumentada para 3 mm, o coeficiente de absorção passa a ser 0,695 a 2500 Hz. Da análise dos resultados obtidos, concluiu-se que, os compósitos formados podem ser desenvolvidos como novos materiais absorventes (Jiang et al, 2012).

Para concluir o estudo acerca dos materiais porosos aqui abordados, irei mencionar mais um estudo, desta vez, feito na China. Um novo compósito foi inventado com o objetivo de melhorar as propriedades acústicas. Esse compósito consiste na introdução de painel de fibra de vidro num painel de sanduiche de favo de abelha. O coeficiente de absorção do som e a perda de

transmissão so som foram determinados num tubo de impedância. Os resultados mostraram que a introdução aleatória de fibras de lã de vidro no painel de favo de abelha melhoraram significativamente essas propriedades, principalmente em frequências abaixo de 4,5 kHz. A vantagem mais notória deste compósito, foi na perda de transmissão do som, que atingiu um máximo de 20 dB em frequências inferiores a 3,0 kHz (Yang et al, 2015).

## 3 AMOSTRAS E PROCEDIMENTO LABORATORIAL

### 3.1 Amostras

Os materiais ensaiados no âmbito desta dissertação foram: Espuma resultante de aglomeração de espuma flexível de poliuretano (Aglomex), espuma de resina de melamina (Basotect), fibra de coco, lã de vidro em painel e fibras de poliéster.

Espuma resultante de aglomeração de espuma flexível de poliuretano (Aglomex) é um material leve resultante de reutilização de espumas de poliuretano com diferentes espessuras e densidades, após serem prensadas e cortadas com as dimensões desejadas. Como apresenta carácter poroso considerável, é então integrado neste estudo. Espuma de resina de melamina (Basotect) apresenta características importantes para o isolamento acústico. Uma vez que é leve, tem bom comportamento ao fogo e a mais importante para este estudo, é poroso. A fibra de coco é um material que resulta da casca de coco, através da submissão a processos industriais específicos. Sendo um material leve, renovável (amigo do ambiente e por isso, sustentável) e poroso, é um candidato interessante para este estudo. Sendo também uma fibra vegetal, apresenta várias vantagens de aplicação. Como por exemplo: baixa densidade, durabilidade, biodegradável, alta resistência mecânica e notáveis propriedades térmicas e acústicas. A lã de vidro é feita a partir de fibras com base em areia e vidro reciclado, que são aglomeradas por resinas sintéticas. É um material leve e flexível, poroso e de fácil instalação. As fibras de poliéster são fibras sintéticas de base polimérica. É um material de grande flexibilidade, boa aderência, com espessura definida e constante, fácil e de rápida aplicação. As figuras 3, 4, 5, 6 e 7 mostram as diferentes amostras.



Figura 4 – Espuma resultante da aglomeração de espuma flexível de poliuretano (Aglomex).

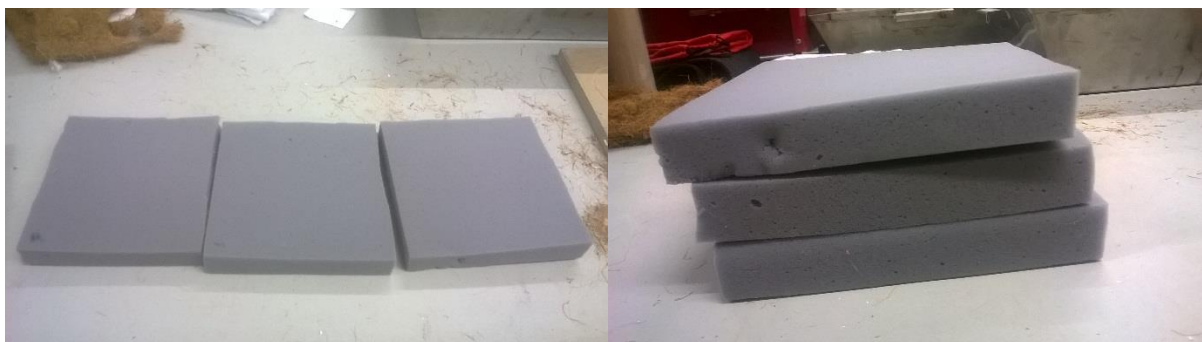


Figura 5 – Espuma de resina de melamina (Basotect).



Figura 6 – Fibra de Coco.



Figura 7 – Lã de Vidro em Painel.

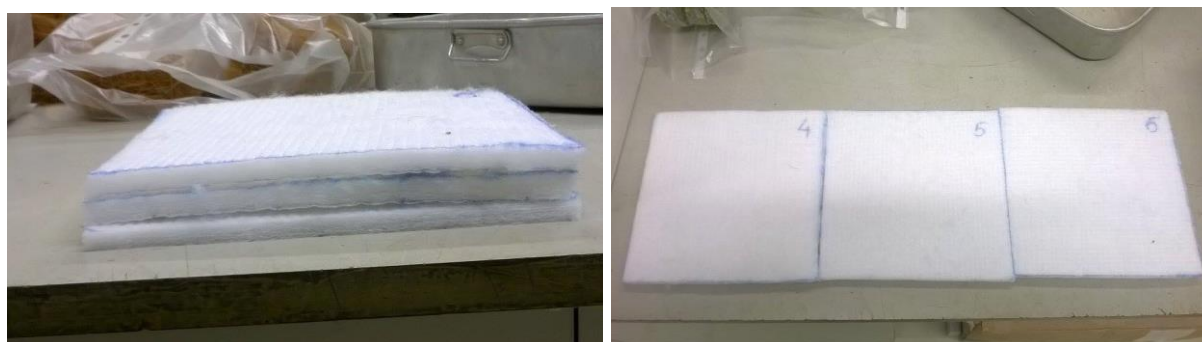


Figura 8 – Fibras de Poliéster.

Para efeitos de comparação dos resultados o ideal seria que todos os materiais ensaiados tivessem as mesmas espessuras.

Para a espuma de poliuretano e fibra de coco ensaiaram-se provetes com as espessuras de 10 mm e 20 mm. Para a espuma de melamina as espessuras dos provetes ensaiados foram de 20 mm e 30 mm. Foram ensaiados provetes da lã de vidro em painel com espessura de 15 mm. Por último, ensaiaram-se provetes da fibra de poliéster com 5 mm e 6 mm.



O quadro 1 resume as diferentes espessuras dos provetes de cada amostra, que foram ensaiados.

Amostras	Espessuras (mm)	
	Espuma de Poliuretano (Aglomex)	10
Espuma de Melamina (Basotect)	20	30
Fibra de Coco	10	20
Lã de Vidro em Pannel	15	-
Fibras de Poliéster	5	6

Quadro 1 – Espessuras dos provetes de cada amostra.

As espessuras indicadas são as espessuras nominais dos materiais. Durante os ensaios foram medidas as espessuras exatas de cada provete, as quais foram usadas nos cálculos quando necessário.

Os provetes foram medidos e pesados e determinou-se a massa volúmica aparente de cada material a qual se apresenta no quadro 2.

Amostras	Espessura (mm)	Massa Volúmica Aparente ( $\text{Kg/m}^3$ )
Fibra de Coco	10	81,9
Fibra de Coco	20	79,5
Aglomex	10	79,6
Aglomex	20	73,6
Basotect	20	7,3
Basotect	30	7,0
Poliéster	5	50,4
Poliéster	6	59,2
Lã de Vidro	15	81,1

Quadro 2 – Massa volúmica aparente de todas as amostras.

## 3.2 Procedimento Laboratorial

### 3.2.1 Procedimento Experimental do Ensaio da Rigidez Dinâmica

O ensaio da rigidez dinâmica tem por base o funcionamento de um sistema massa-mola. Num pavimento flutuante, os materiais porosos, serão a mola e a lajeta flutuante será a massa. O procedimento do ensaio está descrito na norma ISO 9052-1, tendo por base o método da ressonância, que mede a frequência de ressonância do sistema massa-mola.

Para a determinação da rigidez dinâmica utilizaram-se os seguintes aparelhos e utensílios: balanças; paquímetros; tesouras; termohigrómetro; martelo de impacto; acelerómetro e pré-amplificador; Shaker; Multi-Analisador Pulse TM e computador.

Prepararam-se 3 provetes, de cada amostra, com forma quadrada, de dimensões 200 mm\*200 mm e com a ajuda do paquímetro mediu-se a espessura, nos quatro lados, e registou-se. A massa também foi registada. Após este processo, recobriu-se cada provete com película de plástico impermeável ( $\approx 0,02$  mm de espessura) sobre a qual foi aplicada uma camada de gesso fina e homogénea, de pelo menos 5 mm de espessura. A placa de carga em aço, aplicada sobre o conjunto, provete mais gesso, tem dimensões  $200 \pm 3$  mm \*  $200 \pm 3$  mm e foi colocada antes da camada de gesso secar. O provete foi colocado entre a placa de carga (aço) e a base, como mostra a figura 9,

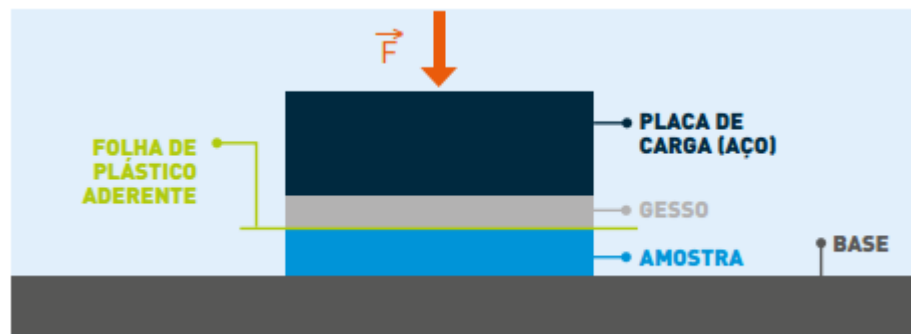


Figura 9 – Esquema de preparação do ensaio para determinar a rigidez dinâmica (adaptado de Marcolino et al, 2015).

A superfície da base e da placa de carga tinham uma irregularidade inferior a 0,5 mm e eram suficientemente rígidas para evitar ondas de flexão na gama de frequências de interesse.

A carga total sobre o provete, incluindo todo o equipamento de medição e/ou excitação, foi respeitada, sendo  $8 \pm 0.5$  kg. Os dispositivos de medição e excitação foram colocados de modo a não ocorrer oscilações horizontais e rotações, e a excitação foi aplicada de acordo com a figura 10.

A base foi uma bancada onde a sua velocidade é desprezada comparada com a da placa de carga. O ensaio foi feito após  $24 \pm 2$  h de preparação dos 3 provetes, para que a camada de gesso tivesse tempo suficiente de secar.

A excitação é provocado pelo martelo de impacto e os batimentos são aplicados sobre a placa de carga do provete (aço) de modo a que só ocorram oscilações verticais (sem componente horizontal e rotação).

A figura 10 apresenta uma fotografia do ensaio que ilustra a excitação por impato,



Figura 10 – Excitação do provete.

O acelerómetro colocado no centro do provete mede a aceleração da vibração. O ensaio é repetido para 4 pontos distintos de impacto próximos do acelerómetro. Os resultados são registados e o software calcula uma função de transferência de resposta em frequência, que é a razão entre a aceleração e a força. Na curva da função de transferência é possível localizar a frequência de ressonância,  $f_r$ .

No fim, retirou-se a chapa de aço e o gesso, voltou-se a pesar e a medir nos 4 lados do provete a espessura e, registou-se.

A rigidez dinâmica aparente por unidade de área do provete,  $s'_t$  é obtida de acordo com a expressão:

$$s'_t = 4\pi^2 m'_t f_r^2 \quad (3)$$

onde,  $s'_t$  é a rigidez dinâmica aparente por unidade de área do provete, medida em (MN/m<sup>3</sup>)

$f_r$  – Frequência de ressonância medida (Hz)

$m'_t$  – Massa total usada durante o ensaio por unidade de área (kg/m<sup>2</sup>)

A frequência de ressonância é dada pela seguinte expressão:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_t}{m'_t}} \quad (4)$$

### 3.2.2 Procedimento Experimental do Ensaio da Resistividade ao Fluxo de Ar

O ensaio para a determinação da resistividade ao fluxo de ar segue os procedimentos descritos na norma ISO 9053 para o método A. Durante a realização dos ensaios foram usados os seguintes aparelhos e utensílios: dispositivo de corte dos provetes; sistema de ar comprimido; equipamento de medição de pressão – célula de medição no interior da qual o provete é colocado, dispositivo de produção de fluxo de ar constante/estável, dispositivo de medição da taxa volumétrica do fluxo de ar e dispositivo de medição da diferença à entrada e saída da célula de medição; computador com software adequado para controlar o equipamento de medição e registar os dados obtidos; balança; paquímetro e termohigrómetro.

Foram ensaiados 6 provetes de cada amostra, com geometria circular, diâmetro de 100 mm, de acordo com a forma e as dimensões da célula de medição. Mediu-se a espessura em 4 pontos à volta do provete e registou-se. A preparação foi cuidadosa, de modo a que não ocorresse distorção dos provetes quando colocados na célula de medição.

A figura 11 apresenta uma fotografia do equipamento usado no ensaio,



Figura 11 – Equipamento do ensaio da resistividade ao fluxo de ar.

O equipamento está ligado a uma rede de ar comprimido que permite estabilizar a pressão a  $2 \times 10^5$  Pa. Os provetes são colocados na célula de medição com o contorno devidamente vedado.

É permitido definir pelo software a velocidade inicial e final do fluxo de ar assim como um determinado número de medições entre valores impostos, inicial e final.

Para a medição em cada provete, é introduzido no software um valor inicial e final de velocidade do fluxo de ar à entrada e à saída da célula de medição, que controla o fluxo de ar que passa através do provete. Durante este processo, a queda de pressão resultante é calculada automaticamente. Durante o ensaio, regista-se a resistividade ao fluxo de ar para as diferentes velocidades do fluxo de ar. A resistividade ao fluxo de ar do material é determinada para a velocidade de  $0.5 \times 10^{-3}$  m/s, a partir da reta obtida pela regressão linear dos diferentes pontos registados. A reta obtida pela regressão linear representa a resistividade ao fluxo de ar em função da velocidade de fluxo de ar.

Note-se que só são aceites resultados do ensaio, quando o coeficiente de correlação da reta obtida por regressão linear, for superior a 0.8.

A resistência ao fluxo de ar que o material poroso oferece, é dada pela seguinte expressão,

$$R = \frac{\Delta p}{qv} \quad \left[ \frac{Pa.s}{m^3} \right] \quad (5)$$

$\Delta p$  – Diferença da pressão entre as duas faces do provete (Pa).

$qv$  – é a taxa volumétrica de fluxo de ar que passa através do provete ( $m^3/s$ ).

A velocidade linear do fluxo de ar é definida por:

$$u = \frac{qv}{A} \quad \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (6)$$

onde,

A - Área da secção transversal do provete, perpendicular à direção do fluxo ( $m^2$ ).

A resistência específica ao fluxo de ar,  $R_s$  é obtida pela expressão,

$$R_s = RA \left[ \frac{Pa.s}{m} \right] \quad (7)$$

R – resistência do provete ao fluxo de ar ( $Pa.s/m^3$ )

Para determinar a resistividade ao fluxo de ar, usa-se a seguinte expressão,

$$r = \frac{R_s}{d} \left[ \frac{Pa.s}{m^2} \right] \quad (8)$$

$R_s$  – Resistência específica do provete ao fluxo de ar ( $Pa.s/m$ ).

d – espessura do provete na direção do fluxo (m).

### **3.2.3 Procedimento Experimental do Ensaio para a determinação do Coeficiente de Absorção Sonora em Tubo de Impedância**

A determinação do coeficiente de absorção sonora em tubo de impedância segue os procedimentos descritos na norma EN ISO 10534-2. Os aparelhos e utensílios utilizados na realização do ensaio são: Tubo de impedância, de acordo com as exigências da norma ISO 10534-2; Calibrador acústico tipo 1, conforme definido na norma IEC 942; equipamento de aquisição de sinal (Pulse); termómetro com uma classe de exatidão de 0,5 °C; barómetro com uma classe de exatidão de 0,5 kPa.

Com a ajuda do calibrador verificou-se a precisão do microfone. Antes de qualquer ensaio, foi respeitado um período de pelo menos 10 minutos em que a fonte emissora (altifalante) ficou ligada, emitindo ruído, para que as condições de temperatura dentro do tubo fossem estabilizadas.

Foram ensaiados 2 provetes de cada amostra. Os provetes têm forma circular e encaixam perfeitamente no suporte de amostras. Como refere a norma, a superfície dos provetes ficou perpendicular ao eixo do tubo de impedância.

Na figura 12 está representado o dispositivo de ensaio, segundo a norma ISO 10534-2,



Figura 12 – Tubo de impedância.

Note-se que o nível sonoro com a fonte ligada tem de ser superior em pelo menos 10 dB ao nível sonoro sem a fonte em funcionamento, em toda a gama de frequências. O fator de calibração é determinado para anular os erros de fase dos 2 microfones. E, para isso, é necessário usar uma amostra absorvente sonora medida com os microfones em posição invertida e na posição correta.

Os ensaios foram realizados em dois tubos de impedância com diâmetros de 100 mm e de 29 mm.

A gama de frequências que se pode analisar estão entre os seguintes limites,



$$D=100 \text{ mm} \Rightarrow 100 \text{ Hz} < f < 1600 \text{ Hz}$$

$$D= 29 \text{ mm} \Rightarrow 500 \text{ Hz} < f < 6300 \text{ Hz}$$

Durante o ensaio determina-se o coeficiente de reflexão para incidência normal através duma função transferência das pressões obtidas nos dois microfones.

O coeficiente de absorção é calculado de acordo com

$$\alpha = 1 - |r|^2 \tag{9}$$

Em que  $r$  é o coeficiente de reflexão para a incidência normal.

### 3.2.4 Carregamento das Amostras

Algumas amostras selecionadas, foram carregadas com uma massa de 20 Kg durante 35 dias. Após este procedimento foram ensaiadas novamente. O objetivo foi verificar qual a influência do carregamento nas propriedades dos materiais. Refira-se que muitos materiais quando estão em serviço (nos edifícios) estão sujeitos a cargas como por exemplo os materiais que ficam sob lajetas flutuantes. Os materiais usados para absorção sonora não estão tão sujeitos a estes carregamentos. No entanto também foram ensaiados após carregamento. No quadro 3 indicam-se as amostras que foram sujeitas a carregamento e as espessuras nominais e reais assim como a espessura após carregamento.

	Espessuras nominais (mm)		Espessuras médias (mm)		Espessura média após carregamento (mm)	
	Fibra de Coco	10	20	13,0	17,4	10,8
Fibras de Poliéster	5	6	4,2	6,5	2,4	4,9

Quadro 3 – Materiais submetidos a carregamento.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1 Resultados do Ensaio da Rigidez Dinâmica

Nesta secção apresentam-se os valores da rigidez dinâmica aparente obtidos para as várias amostras ensaiadas.

Para cada provete obtém-se quatro gráficos, um para cada ponto que se excitou, como aquele que se apresenta na figura 13.

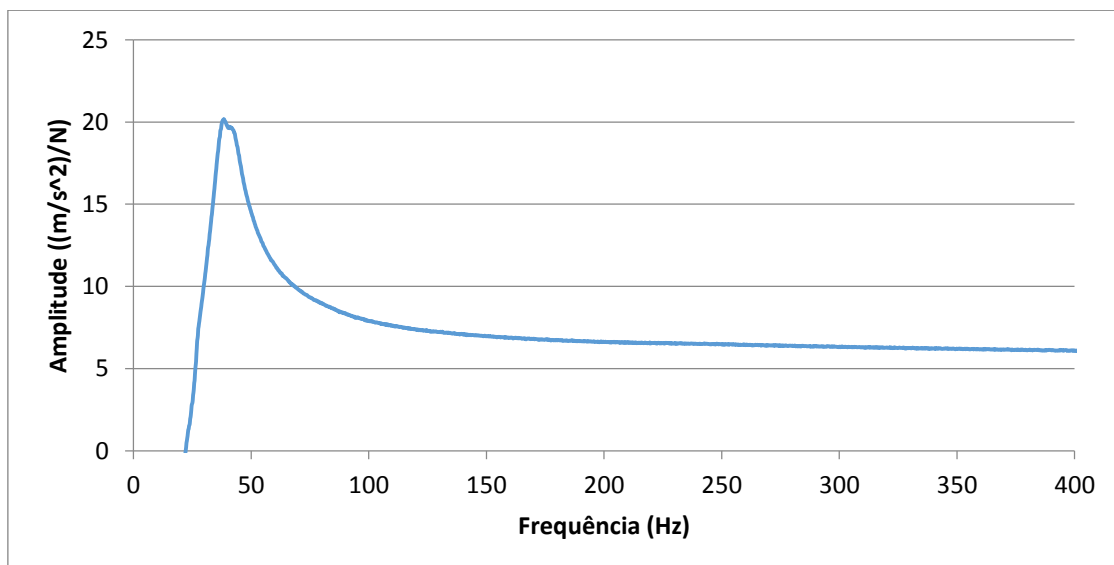


Figura 13 – Frequência de ressonância e amplitude no ponto máximo num ponto de excitação do provete.

	Ponto máximo
Frequência (Hz)	38,44
Amplitude ((m/s <sup>2</sup> )/N)	20,17

Quadro 4 – Frequência de ressonância e amplitude no ponto máximo.

Para cada provete obtém-se quatro gráficos como o do exemplo anterior e faz-se a média das frequências de ressonância máxima e repete-se a análise para os restantes provetes da mesma amostra, sendo no fim feita uma média das frequências de ressonância dos três provetes e calcula-se a rigidez dinâmica aparente da amostra, pela equação (3). O mesmo procedimento é repetido para todas as amostras.

No quadro 5 estão os valores da rigidez dinâmica aparente para cada uma das duas espessuras da espuma de poliuretano (Aglomex).

	Espessuras (mm)	
	10	20
Rigidez Dinâmica Aparente (MN/m <sup>3</sup> )	9,9	4,6

Quadro 5 – Rigidez dinâmica aparente para as espessuras de 10 mm e 20 mm de espuma de poliuretano.

Como era esperado a rigidez dinâmica aparente é maior para a menor espessura da amostra. Verifica-se que para o dobro da espessura, a rigidez dinâmica aparente diminui cerca de metade, 53%.

No quadro 6 estão os valores da rigidez dinâmica aparente para cada uma das duas espessuras da espuma de melamina (Basotect).

	Espessuras (mm)	
	20	30
Rigidez Dinâmica Aparente ( $MN/m^3$ )	7,7	6,3

Quadro 6 – Rigidez dinâmica aparente para as espessuras de 20 mm e 30 mm de espuma de melamina.

Para a espuma de melamina, o resultado também foi o esperado, ou seja, para a espessura menor a rigidez dinâmica aparente é maior. Há uma relação de 1,22 entre os valores da rigidez dinâmica aparente para uma relação da espessura de 1,5. A rigidez dinâmica aparente reduziu cerca de 18,2%.

No quadro 7 estão os valores da rigidez dinâmica aparente sem e com carregamento, para cada uma das duas espessuras da fibra de coco.

	Espessuras nominal (mm)	
	10	20
Rigidez Dinâmica Aparente ( $MN/m^3$ )	8,8	6,2
Rigidez Dinâmica Aparente após Carregamento ( $MN/m^3$ )	9,1	7,4

Quadro 7 – Rigidez dinâmica aparente sem e com carregamento para as espessuras de 10 mm e 20 mm de fibra de coco.

A rigidez dinâmica aparente sem carregamento diminuiu 30% para um aumento da espessura e com carregamento diminuiu cerca de 19%. Para a espessura de 10 mm, a rigidez dinâmica aparente aumentou cerca de 3,4 % com o carregamento e para os 20 mm aumentou aproximadamente 19%. Após carregamento a relação das espessuras é de 1,31 para uma relação

de 1,23 da rigidez dinâmica aparente. Como as espessuras da fibra de coco são próximas das espessuras da espuma de poliuretano, podem-se comparar os valores da rigidez dinâmica aparente sem carregamento. Enquanto para a espuma de poliuretano houve redução de 53% da rigidez dinâmica aparente, na fibra de coco houve redução de 30% pode-se concluir que, há uma maior redução (com uma diferença de cerca 23%) na rigidez dinâmica aparente sem carregamento para a espuma de poliuretano em relação à fibra de coco. O resultado foi o esperado, maior rigidez dinâmica aparente para a menor espessura em ambos os casos e aumento da rigidez dinâmica aparente com o carregamento.

No quadro 8 apresentam-se os valores da rigidez dinâmica aparente para a espessura de 15 mm da lã de vidro em painel.

	Espessura (mm)	
	15	
Rigidez Dinâmica Aparente ( $MN/m^3$ )	5,4	

Quadro 8 – Rigidez dinâmica aparente para a espessura de 15 mm da lã de vidro em painel.

Como não há outra lã de vidro para comparar, o valor da rigidez dinâmica aparente obtido é  $5,4 MN/m^3$  para 15 mm de espessura.

No quadro 9 apresentam-se os valores da rigidez dinâmica aparente para cada uma das espessuras da fibra de poliéster.

	Espessuras (mm)	
	5	6
Rigidez Dinâmica Aparente ( $MN/m^3$ )	8,7	6,0
Rigidez Dinâmica Aparente com Carregamento ( $MN/m^3$ )	14,8	7,9

### Quadro 9 – Rigidez dinâmica aparente para a espessura de 5 mm e de 6 mm da fibra de poliéster.

Para a relação de 1,5 das espessuras reais, a relação da rigidez dinâmica aparente sem carregamento é de 1,45. A relação da espessura após carregamento é 2,0 e a relação da sua rigidez dinâmica aparente é de 1,87. A rigidez dinâmica aparente com carregamento para os 5 mm aumentou 70% e para os 6 mm aumentou 31% em relação ao inicial. Conclui-se que há uma diminuição da rigidez dinâmica aparente para ambas as espessuras antes e após carregamento como era esperado.

## 4.2 Resultados do Ensaio da Resistividade ao Fluxo de Ar

A resistividade ao fluxo de ar é um parâmetro independente da espessura. No entanto é expectável que ensaiando o mesmo material com espessuras diferentes possamos ter valores algo diferentes. A norma de ensaio refere que para materiais com espessuras reduzidas devem ser ensaiadas várias camadas de material.

Apresenta-se um exemplo da análise e tratamento de resultados do ensaio. Na figura 14 está representada a resistividade do fluxo de ar em função da velocidade linear do fluxo de ar, de um dos provetes ensaiados.

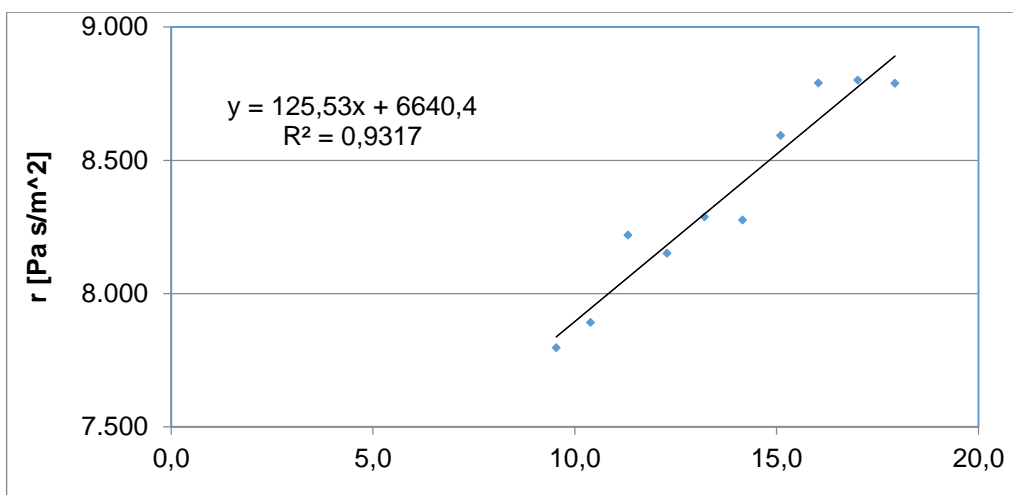


Figura 14 – Resistividade ao fluxo de ar em função da velocidade do fluxo de ar (mm/s).

Para cada um dos seis provetes de cada amostra, é feito um gráfico como o da figura 14, com a reta obtida pela regressão linear. A partir dessa reta calcula-se o valor da resistividade ao fluxo correspondente a uma velocidade de 0,5 mm/s. Para cada amostra e faz-se a média dos diferentes resultados registados da resistividade ao fluxo de ar dos seis provetes e repete-se o mesmo processo para as restantes amostras.

No quadro 10 estão os valores da resistividade ao fluxo de ar para cada uma das duas espessuras da espuma de poliuretano (Aglomex).

	Espessuras (mm)	
	10	20
Resistividade ao Fluxo de Ar (Pa.s/m <sup>2</sup> )	12775,7	16281,2

Quadro 10 – Resistividade ao fluxo de ar para as espessuras de 10 mm e 20 mm da espuma de poliuretano.

Para o dobro da espessura, a resistividade ao fluxo de ar aumentou cerca de 27,4%, ou seja, é importante a espessura que se utiliza para a determinação da resistividade ao fluxo de ar. A resistividade ao fluxo de ar longitudinal determinada, está entre 12.8 kPa.s/m<sup>2</sup> e 16.3 kPa.s/m<sup>2</sup>. Embora a resistividade ao fluxo de ar lateral possa ser inferior, se se verificar a mesma tendência

que se verifica para a lã de rocha, se o valor não fosse inferior a  $10 \text{ kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ , seria necessário corrigir a rigidez dinâmica aparente, com a rigidez do ar contido nos poros.

No quadro 11 apresentam-se os valores da resistividade ao fluxo de ar para cada uma das duas espessuras da espuma de melamina (Basotect).

	Espessuras (mm)	
	20	30
Resistividade ao Fluxo de Ar ( $\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ )	7449,2	7163,2

Quadro 11 – Resistividade ao fluxo de ar para as espessuras de 20 mm e 30 mm da espuma de melamina.

A resistividade ao fluxo de ar é maior para a menor espessura, no entanto os valores aproximam-se bastante. Na realização do ensaio, para a espuma com espessura de 20 mm, foi admitido um coeficiente de correlação com média de 0,72, devido à dificuldade de encontrar valores superiores a 0,8 que é o estabelecido pelo procedimento de ensaio.

A resistividade ao fluxo de ar longitudinal determinada, está entre  $7.4 \text{ kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  e  $7.2 \text{ kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ . Como os valores são inferiores a  $10 \text{ kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ , não seria necessário corrigir a rigidez dinâmica aparente, com a rigidez do ar contido nos poros.

No quadro 12 apresentam-se os valores da resistividade ao fluxo de ar sem e com carregamento para cada uma das duas espessuras da fibra de coco.

	Espessuras (mm)	
	10	20
Resistividade ao Fluxo de Ar ( $\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ )	191,6	183,9
Resistividade ao Fluxo de Ar com Carregamento ( $\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ )	590,4	306,2



Quadro 12 – Resistividade ao fluxo de ar para as espessuras de 10 mm e 20 mm da fibra de coco.

Verifica-se que a resistividade ao fluxo de ar diminui com o aumento da espessura tanto no ensaio inicial como no ensaio após carregamento. A fibra de coco, em comparação com a espuma de poliuretano, uma vez que têm espessuras semelhantes, sem carregamento, tem muito menor resistividade ao fluxo de ar que a espuma de poliuretano. Para a espessura de 10 mm há uma redução da resistividade ao fluxo de ar de 98,5% entre a amostra de poliuretano e a amostra de fibra de coco. No caso da espessura de 20 mm uma diferença de cerca de 98,8%. Como a diferença é muito grande, conclui-se que para as mesmas espessuras a espuma de poliuretano tem uma eficácia da resistividade ao fluxo de ar quase 100% em relação à fibra de coco. Mas, a resistividade ao fluxo de ar para a mesma espessura da fibra de coco aumentou com o carregamento. A resistividade ao fluxo de ar longitudinal determinada, está entre 7.4 kPa.s/m<sup>2</sup> e 7.2 kPa.s/m<sup>2</sup>. Como os valores da resistividade ao fluxo de ar longitudinal são inferiores a 10 kPa.s/m<sup>2</sup>, não seria necessário corrigir a rigidez dinâmica aparente, com a rigidez do ar contido nos poros.

No quadro 13 apresentam-se os valores da resistividade ao fluxo de ar para a espessura de 15 mm da lã de vidro em painel.

	Espessura (mm)
	15
Resistividade ao Fluxo de Ar (Pa.s/m <sup>2</sup> )	27115,0

Quadro 13 – Resistividade ao fluxo de ar para a espessura de 15 mm da lã em painel.

A lã de vidro foi o material que obteve a maior resistividade ao fluxo de ar de todas as amostras. Uma vez que os valores da resistividade ao fluxo de ar longitudinal são superiores a 10 kPa.s/m<sup>2</sup> e inferior a 100 kPa.s/m<sup>2</sup>, seria necessário corrigir a rigidez dinâmica aparente, com a rigidez do ar contido nos poros.

No quadro 14 apresentam-se os valores da resistividade ao fluxo de ar sem e com carregamento para cada uma das duas espessuras da fibra de poliéster.

	Espessuras (mm)	
	5	6
Resistividade ao Fluxo de Ar ( $\text{Pa.s/m}^2$ )	6420,0	10286,7
Resistividade ao Fluxo de Ar com Carregamento ( $\text{Pa.s/m}^2$ )	11549,5	14744,1

Quadro 14 – Resistividade ao fluxo de ar para as espessuras de 5 mm e 6 mm da fibra de poliéster.

A resistividade ao fluxo de ar aumenta com o aumento da espessura. Verificou-se um aumento da resistividade ao fluxo de ar após o carregamento das amostras.

Para as amostras que não foram carregadas, a resistividade ao fluxo de ar lateral poderia dar valores inferiores a  $10 \text{ kPa.s/m}^2$  e não seria necessário corrigir a rigidez dinâmica aparente, com a rigidez do ar contido nos poros. No entanto, após carregamento, como os valores da resistividade ao fluxo de ar longitudinal estão entre  $11.5 \text{ kPa.s/m}^2$  e  $14.7 \text{ kPa.s/m}^2$ , a resistividade ao fluxo lateral poderia dar valores já superiores a  $10 \text{ kPa.s/m}^2$  e seria necessário corrigir a rigidez dinâmica.

### 4.3 Resultados do Ensaio para determinação do Coeficiente de Absorção Sonora em Tubo de Impedância

No gráfico da figura 15 estão representados os valores do coeficiente de absorção sonora de todas as amostras, em bandas de terços de oitava.

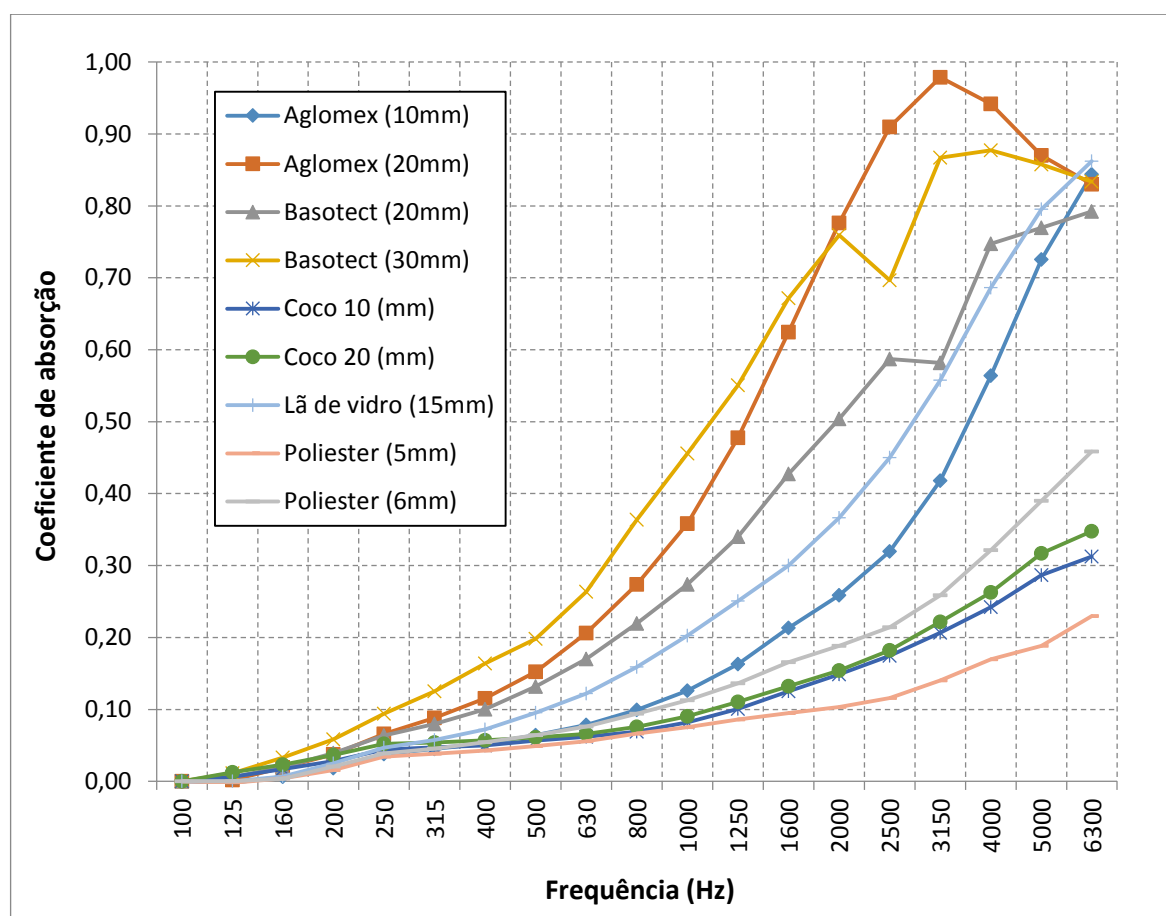


Figura 15 – Coeficientes de absorção sonora em função da frequência para todas as amostras.

O coeficiente de absorção sonora varia com a frequência. Verifica-se que o coeficiente de absorção sonora, de uma maneira geral, aumenta com a frequência. No entanto, alguns materiais apresentam um máximo e a seguir o coeficiente de absorção sonora diminui.

Da análise do gráfico, verifica-se que entre as espumas de poliuretano (aglomex), a que tem maior espessura obteve maior coeficiente de absorção sonora máximo com um valor de 0,98 para a frequência de 3150 Hz. Na amostra de menor espessura obteve-se o valor máximo de 0,84 para 6300 Hz. Na lã de vidro em painel obteve-se o valor máximo de 0,86 para a frequência de 6300 Hz. A espuma de melamina (basotect) com a espessura maior apresenta um coeficiente de absorção sonora máximo de 0,83 para 6300 Hz e a de menor espessura apresenta um máximo de 0,79 pra 6300 Hz. Para a fibra de poliéster, o coeficiente de absorção sonora maior verifica-se para a fibra com maior espessura, com um valor máximo de 0,46, enquanto para a fibra de menor espessura o máximo é 0,23, ambos para a frequência de 6300 Hz. Por último, o

coeficiente de absorção sonora para as duas espessuras da fibra de coco é próximo. Refira-se que, este material tem uma porosidade muito aberta e uma resistividade ao fluxo de ar muito baixa, o que faz com que a espessura não tenha muita influência na absorção sonora, pois a onda sonora consegue atravessar o material facilmente. A maior espessura apresenta um valor máximo de 0,35 e a menor espessura um máximo de 0,31 para a mesma frequência, 6300 Hz. Como o valor máximo está próximo para as duas espessuras, pode-se concluir que o aumento de espessura para a fibra de coco não é significativo para o aumento do coeficiente de absorção sonora.

O quadro 15 resume os vários coeficientes de absorção sonora máximos para todas as amostras em função da frequência.

Amostras	Espessura (mm)	Coefficiente de Absorção Sonora Máximo	Frequência (Hz)
Coco	10	0,31	6300
Coco	20	0,35	6300
Aglomex	10	0,84	6300
Aglomex	20	0,98	6300
Basotect	20	0,79	3150
Basotect	30	0,83	6300
Poliéster	5	0,23	6300
Poliéster	6	0,46	6300
Lã de Vidro	15	0,86	6300

Quadro 15 – Coeficiente de absorção sonora máximo para todas as amostras em função da frequência.

Da análise dos resultados, pode-se concluir que para todas as amostras, o coeficiente de absorção sonora diminuiu com a diminuição da espessura.

No gráfico da figura 16 estão apresentados os valores dos coeficientes de absorção sonora com e sem carregamento para as amostras que foram carregadas.

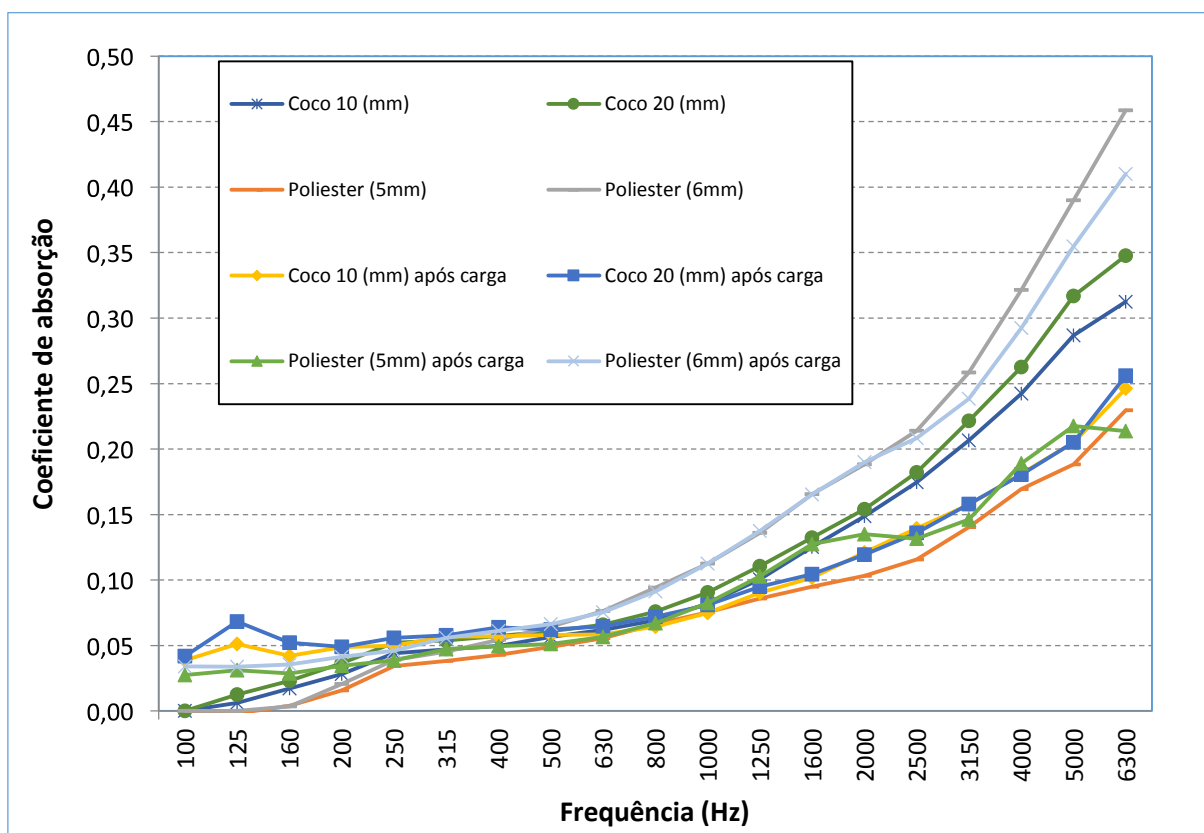


Figura 16 – Coeficientes de absorção sonora em função da frequência para todas as amostras com carregamento.

Da análise do gráfico, verifica-se que as fibras de poliéster com 6 mm de espessura a 6300Hz, obtiveram um coeficiente de absorção máximo de 0,46 e após carregamento este valor diminuiu, para 0,41. Nas fibras de menor espessura obteve-se um máximo de 0,23 antes do carregamento e 0,21 após o carregamento, para a mesma frequência. Nas fibras de coco, o valor máximo de coeficiente de absorção sonora para a maior espessura sem carregamento é de 0,35 e 0,26 após carregamento na mesma frequência de 6300 Hz. Para as fibras de coco de menor espessura e antes do carregamento, o coeficiente de absorção máximo é de 0,31 e após carregamento é de 0,25, também para a frequência de 6300 Hz. Pode-se concluir que para a mesma espessura de ambas as amostras e a 6300 Hz, o coeficiente de absorção sonora máximo diminuiu após carregamento.

O quadro 16 resume os coeficientes de absorção sonora máximos obtidos para as fibras de poliéster e fibras de coco antes e após carregamento.

Coeficiente de Absorção Sonora Máximo				
Amostras	Espessura (mm)	Sem Carregamento	Com Carregamento	Frequência (Hz)
Coco	10	0,31	0,25	6300
Coco	20	0,35	0,26	6300
Poliéster	5	0,23	0,21	6300
Poliéster	6	0,46	0,41	6300

Quadro 16 – Coeficiente de absorção sonora máximo com e sem carregamento em função da frequência.

Observa-se no quadro 15 que ainda é mais notória a aproximação do coeficiente de absorção sonora máximo após o carregamento para as duas espessuras da fibra de coco em relação ao inicial. Para as fibras de poliéster tanto no ensaio inicial como no ensaio com carregamento, o coeficiente de absorção sonora máximo aumentou para o dobro com o aumento da espessura. No geral, há uma redução do coeficiente de absorção sonora máximo quando a espessura é menor, em todas as amostras, antes e após carregamento, para a mesma frequência.

#### 4.4 Correlação das Amostras com os Ensaio

Após a análise de resultados das amostras para cada um dos ensaios, procedeu-se à correlação de todos os ensaios com todas as amostras ensaiadas. No quadro 17 apresentam-se os valores da rigidez dinâmica aparente, coeficiente de absorção sonora e resistividade ao fluxo de ar de todas as amostras. Ordenaram-se as amostras de 1 a 9 em função da absorção sonora (da mais alta para a mais baixa).

Amostras		Rigidez Dinâmica Aparente (MN/m <sup>3</sup> )	Resistividade ao Fluxo de Ar (Pa.s/m <sup>2</sup> )	Coefficiente de Absorção Sonora
Aglomex 20	1	4,6	16281,2	0,98
Basotect 30	2	6,3	7163,2	0,83
Basotect 20	3	7,7	7449,2	0,79
Lã de Vidro 15	4	5,4	27115,0	0,86
Aglomex 10	5	9,9	12775,7	0,84
Poliéster 6	6	6	10286,7	0,46
Coco20	7	6,2	183,9	0,35
Coco 10	8	8,8	191,6	0,31
Poliéster 5	9	8,7	6420,0	0,23

Quadro 17 – Rigidez dinâmica aparente, resistividade ao fluxo de ar e coeficiente de absorção sonora sem carregamento de todas as amostras.

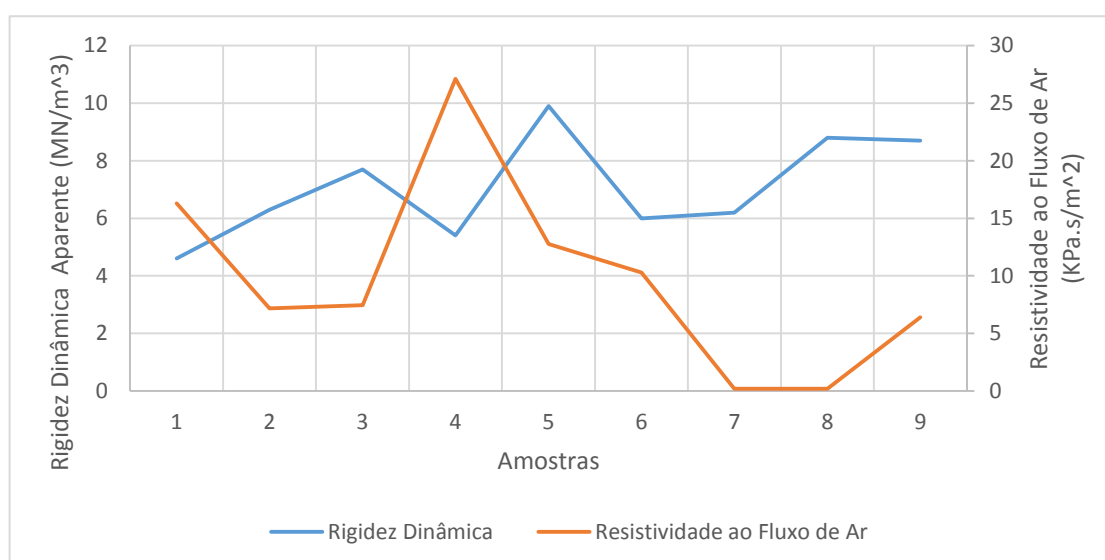


Figura 17 – Correlação de todas as amostras com a rigidez dinâmica aparente, resistividade ao fluxo de ar e coeficiente de absorção sonora.

A amostra que apresenta maior absorção (Aglomex 20) apresenta o menor valor de rigidez dinâmica e um valor de resistividade ao fluxo de ar que não é demasiado elevado. As amostras de Basotect são as segundas melhores em termos de absorção sonora (2º e 3º lugar). A rigidez dinâmica é superior à da amostra de Aglomex 20, mas a resistividade ao fluxo é mais baixa. A fibra de vidro, apesar de apresentar uma resistividade ao fluxo de ar mais elevada que o Basotect

e rigidez dinâmica inferior, aparece em 4º lugar, o que significa que podem existir outras propriedades associadas à estrutura do material (como por exemplo a tortuosidade que não foi determinada) que estão a influenciar a absorção sonora. De qualquer modo, as amostras que apresentam menor absorção sonora são as que têm resistividades ao fluxo de ar mais baixas. Aparentemente não existe uma relação evidente entre a rigidez dinâmica e a absorção sonora.



## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

Neste trabalho selecionaram-se alguns materiais porosos e determinaram-se experimentalmente propriedades tais como a absorção sonora, a rigidez dinâmica e a resistividade ao fluxo de ar. A determinação da resistividade ao fluxo de ar dos materiais também permitiu perceber se a rigidez dinâmica do material necessita de ser corrigida com a rigidez do ar contido nos poros. Alguns materiais foram ensaiados após terem sido carregados durante alguns dias, para verificar o efeito da aplicação de uma carga estática nas suas propriedades. Finalmente verificou-se se era possível estabelecer alguma correlação entre as propriedades determinadas.

Verificou-se que a rigidez dinâmica diminuiu com o aumento da espessura dos provetes. Os materiais ensaiados apresentam todos valores de rigidez dinâmica aparente bastante baixos o que significa que, em princípio têm boa capacidade de atenuação dos sons de percussão. Para uma mesma amostra, a rigidez dinâmica tem tendência a aumentar após a amostra estar sujeita a carregamento. Talvez porque os valores da rigidez dinâmica são bastante baixos não ficou evidente nenhuma correlação entre a rigidez dinâmica e a absorção sonora.

A resistividade ao fluxo de ar dos materiais ensaiados é bastante variável. De uma forma geral, observou-se que a resistividade ao fluxo de ar aumenta após carregamento. Observou-se que os materiais com menor resistividade ao fluxo de ar são os que apresentam menor absorção sonora. No entanto, o material que apresenta maior resistividade ao fluxo de ar não é aquele que apresenta maior absorção, o que significa que podem existir outras propriedades associadas à estrutura dos materiais que têm maior influência na absorção sonora.

Os resultados obtidos para o coeficiente de absorção sonora evidenciaram que para a maioria dos materiais a absorção sonora aumenta com o aumento da espessura. No entanto, para materiais com porosidade demasiado aberta (que apresentaram valores muito baixos de

resistividade ao fluxo de ar) o aumento da espessura influencia pouco o aumento da absorção. Verificou-se que não houve grande variação na absorção sonora após as amostras terem sido carregadas.

## **5.2 Trabalhos futuros**

Para possíveis trabalhos no futuro a introdução do ensaio da porosidade neste tipo de estudo seria importante para obter melhor precisão na comparação das propriedades acústicas dos mesmos materiais porosos ou de outros.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrés, J. P. (2016). *Os segredos que escondem os materiais porosos*. Obtido de Agencia de Notícias para a Difusão da Ciência e Tecnologia (DiCYT): <http://www.dicyt.com/noticia/os-segredos-que-escondem-os-materiais-porosos>
- Arenas, J. P., & Crocker, M. J. (2010). Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials.
- Berardi, U., & Iannace, G. (2015). Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. *Building and Environment*, vol. 94, part 2, pp. 840-852.
- Caetano, M. J. (2014). *Interação do Som com os Materiais*. Obtido de [http://ctborracha.com/?page\\_id=1667](http://ctborracha.com/?page_id=1667)
- Domigues, O. (2005). *A Acústica nos Edifícios*. Lisboa: LNEC.
- EN ISO 10534-2:2001. (s.d.). Determinação do coeficiente de absorção sonora em tubo de impedância.
- Fonseca, W. D. (s.d.). *EAC*. Obtido de Engenharia Acústica da UFSM: <http://www.eac.ufsm.br/ensaios/absorcao-sonora-iso-10534-2>
- Fouladi, M. H., Nor, M. J., & Ayub. (2011). Analysis of coir fiber acoustical characteristics. *Applied Acoustics*, vol.72, issue 1, pp. 35-42.
- Garai, M., & Pompoli, F. (2005). A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications. *Applied Acoustics*, vol. 66, issue 12, pp. 1383-1398.
- ISO 7626-5:1994, I-5. (s.d.). Determinação da rigidez dinâmica de materiais resilientes utilizados sob pavimentos flutuantes em edifícios.
- ISO 9053:1991. (s.d.). Determinação da resistência ao fluxo de ar de materiais resilientes utilizados em aplicações acústicas.
- Jiang, S., Xu, Y., Zhang, H., White, C. B., & Yan, X. (2012). Seven-hole hollow polyester fibers as reinforcement in sound absorption chlorinated polyethylene composites. *Applied Acoustics*, vol. 73, issue 3, pp. 243-247.
- Liu, Z., Zhan, J., Fard, M., & Davy, J. L. (2016). Acoustic properties of a porous polycarbonate material produced by additive manufacturing. *Materials Letters*, vol. 181, pp. 296-299.
- Mafra, M. P., Soeiro, N. S., & Alves, E. C. (2005). Desenvolvimento de bancada experimental e determinação da turtuosidade de materiais poroelásticos, utilizando o método da condutividade térmica. *XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica*. Ilha Solteira, São Paulo: Paper CRE05-CA XX.
- Marcolino, D. A. (2015). *MANUAL PROACÚSTICA DE RECOMENDAÇÕES*. São Paulo: Rosa Editora.

- Meloni, R., Chacon, W., Alcântara, G., & Innocentini, M. (s.d.). Avaliação de tortuosidade, porosidade e permeabilidade de amostras.
- Patnaik, A., Mvubu, M., Muniyasamy, S., Botha, A., & Anandjiwala, R. D. (2015). Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers and their biodegradation studies. *Energy and Buildings*, vol. 92, pp. 161-169.
- Pérez, B. C. (Setembro de 2016). Acoustic insulation capacity of Vertical Greenery Systems for buildings.
- Putra, A., Abdullah, Y., Efendy, H., Farid, M. W., Ayob, M. R., & Py, M. S. (2013). Utilizing Sugarcane Wasted Fibers as a Sustainable Acoustic Absorber. *Procedia Engineering*, vol. 53, pp. 632-638.
- Silva, P. M. (1983). *Acústica de edifícios*. Lisboa: LNEC.
- Yang, Y., Li, B., Chen, Z., Sui, N., Chen, Z., Saeed, M. U., . . . Jing, Y. (2016). Acoustic properties of glass fiber assembly-filled honeycomb sandwich panels. *Composites Part B: Engineering*, vol. 96, pp. 281-286.