



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

João Daniel Martins Ferreira

FORMULAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE
MATERIAIS GRANULARES POROSOS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de
Especialização em Construções, orientada pelo Professor Doutor Paulo
Amado Mendes e pelo Professor Doutor Fernando Branco. e apresentada
ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Setembro de 2019



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

João Daniel Martins Ferreira

FORMULAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE
MATERIAIS GRANULARES POROSOS

FORMULATION AND CHARACTERIZATION ACOUSTIC OF POROUS GRANULAR MATERIALS

Dissertação no âmbito do Mestrado em Reabilitação de Edifícios orientada pela
Professora Doutora Ana Teresa Vaz Ferreira e apresentada ao Departamento de
Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade,
legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Setembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é o culminar do meu percurso enquanto estudante de Engenharia Civil na Universidade de Coimbra, e representa a concretização de um sonho que me acompanhou desde cedo. Estou seguro de que, se não tivesse o devido acompanhamento, a força, a presença e o apoio de um conjunto de pessoas, provavelmente não teria conseguido. Por isso, os meus sinceros agradecimentos:

Aos meus prezados orientadores - Professor Doutor Paulo Amado Mendes e Professor Doutor Fernando Branco - por me transmitirem os ensinamentos e metodologias essenciais ao desenvolvimento deste estudo, pela sua permanente disponibilidade, compreensão e acima de tudo pelas palavras de incentivo e amizade nos momentos em que o alento me faltou.

Às empresas Argex – Argila Expandida, S.A. e ValorSul, S.A. que forneceram a matéria prima utilizada, e ao Project iNBRAIL, no qual este estudo se insere, por todo o apoio concedido.

A todos os meus colegas agradeço o companheirismo, as vivências e a amizade que sempre demonstraram ao longo do meu percurso académico, associativo e pessoal. Uma palavra de especial apreço à Marta Pessoa, ao Rafael Várzeas, ao Bruno Rojão, ao Alexandre Amado, ao José Pedro Barge, ao Vítor Hugo e à Salomé Afonso. Outra aos meus colegas da área de acústica que me coadjuvaram na elaboração desta dissertação, o Matheus Pereira e o Luís Pereira.

Ao meu amigo de todas as horas, ao maior dos maiores, àquele que sempre me acompanhou desde o primeiro dia desta etapa, todas as palavras serão poucas para agradecer a pessoa extraordinária que és. Obrigado pela partilha e por teres sido meu companheiro em tantos serões de trabalho. Ser-te-ei eternamente grato, André!

À minha família, em especial aos meus Pais, por todo o esforço que fizeram para que nada me faltasse, por me apoiarem em tudo, por investirem na minha formação académica, e sobretudo por me terem transmitido os valores mais importantes da vida que me permitem ser a pessoa que sou hoje. Às minhas irmãs, que mesmo à distância, nunca me deixaram perder a força e sempre me incentivaram a lutar pelos meus sonhos. Agradeço-lhes os conselhos preciosos, o apoio incondicional, a preocupação e o cuidado permanente que comigo têm. Aos meus sobrinhos pelo elixir da vida. À minha tia Teresa, por estar sempre presente.

À minha avó, que é presença constante e eterna na minha vida...

RESUMO

A crescente preocupação relativamente às questões ambientais, designadamente com a gestão dos resíduos da construção e demolição (RCD) responsáveis por uma parte muito significativa da totalidade dos resíduos produzidos em Portugal (tal como nos demais estados-membros da União Europeia) tem vindo a potenciar o desenvolvimento de soluções que visam incorporar esses mesmos resíduos em diversos produtos. O objetivo é melhorar as características para as quais foram desenvolvidos, dando-lhe uma nova utilidade. Neste estudo, pretende-se aferir a melhoria da atenuação sonora de materiais para incorporação numa barreira acústica com a incorporação de determinados resíduos.

A utilização de materiais granulares porosos é bastante frequente em aplicações de Engenharia Civil, sendo por vezes utilizados em funções acústicas, em virtude do seu interessante comportamento do ponto de vista da absorção sonora. Encontram-se aplicações deste tipo de materiais em elementos construtivos de edifícios, mas igualmente em aplicações exteriores, como as barreiras acústicas, as camadas superficiais de pavimentos ou mesmo de elementos de fachada de edifícios.

No âmbito desta dissertação, usaram-se agregados provenientes de resíduos urbanos, de tipo granular poroso, como matéria-prima, em busca de soluções capazes de serem incorporadas em barreiras acústicas. Neste ensejo, caracterizou-se um conjunto de formulações de materiais para barreiras acústicas com diferentes composições e espessuras, analisando-se a sua influência nos níveis de absorção sonora conferidos por estas soluções acústicas. Realizou-se um conjunto de ensaios experimentais para caracterização das amostras, nomeadamente: o coeficiente de absorção sonora com o auxílio de um tubo de impedância, a permeabilidade, ensaio de perda de matéria ao fogo e ensaios mecânicos (flexão e compressão).

A partir dos resultados experimentais obtidos, pode afirmar-se que a reutilização de resíduos deste tipo se revela bastante promissora e com elevado potencial no setor da construção, não só pela sua componente económica e desempenho acústico, como pela sua sustentabilidade ambiental.

A presente dissertação de mestrado foi desenvolvida no âmbito do projeto com a referência POCI- O1-0247-FEDER-033990 (iNBRail), financiado por fundos FEDER através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI).

Palavras-chave: Barreiras acústicas, materiais granulares porosos, absorção sonora, ruído, incorporação de resíduos.

ABSTRACT

The growing concern regarding environmental issues, namely the management of construction and demolition waste (RCD), responsible for a very significant part of the total waste produced in Portugal (as in the other Member States of the European Union), has been leading to the development of solutions that aim to incorporate these residues in several products. The goal is to improve the features for which they were developed, giving it a new utility. This study aims to assess the improvement of sound attenuation of the constituent material for an acoustic barrier with the incorporation of certain residues.

The use of porous granular materials is very common in civil engineering applications, sometimes being used with acoustic porous due to their interesting behavior from the point of view of sound absorption. Applications of this type of material are found in building elements, but also in exterior applications such as noise barriers, surface layers of floors or even building facade elements.

Within this dissertation, aggregates from porous granular urban waste were used as raw material in search of solutions that can be incorporated into acoustic barriers. In this context, a set of formulations with different composition and thickness was characterized, analyzing their influence on the sound absorption levels conferred by these acoustic solutions. Experimental tests capable of characterizing the samples were carried out, namely: the coefficient of sound absorption measured with the an impedance tube, the permeability, material loss under fire testing and mechanical testing (bending and compression).

From the experimental results obtained, we can say that the reuse of this type of waste is very promising and with high potential in the construction sector, not only for its economic component end technical performance, but also for its environmental sustainability.

The present dissertation was developed within the scope of the project with reference POCI-O1-0247-FEDER-033990 (iNBRail), supported by FEDER funds through the Competitiveness and Internationalization Operational Programme – COMPETE2020 (POCI).

Keywords: Acoustic barriers, porous granular materials, sound absorption, noise, incorporation of waste.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ABREVIATURAS.....	vi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	2
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura da Dissertação	3
2. ESTADO DA ARTE.....	4
2.1. Soluções Acústicas para Aplicação Exterior	4
2.2. Materiais Fibrosos ou Porosos	9
2.3. Incorporação de Resíduos em Soluções Acústicas	11
3. MATERIAIS GRANULARES POROSOS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS....	17
3.1. Caracterização de Matérias-Primas	17
3.1.1. Ligante Hidráulico	17
3.1.2. Resíduo.....	19
3.1.3. Argila Expandida 0-2.....	23
3.2. Desenvolvimento de Formulações de Composições	25
3.3. Caracterização Mecânica e Física	28
3.4. Discussão de Resultados.....	39
4. CARACTERIZAÇÃO DA ABSORÇÃO SONORA DOS MATERIAIS GRANULARES	41
4.1. Conceitos Gerais de Propagação do Som	41
4.1.1. Velocidade do Som.....	41
4.1.2. Equação de Onda	42
4.1.3. Impedância Característica do Meio	42
4.1.4. Absorção Sonora.....	43
4.2. Ensaio em Tubo de Impedância	44
4.3. Caracterização e Descrição das Amostras	46
4.4. Resultados do Ensaio Laboratorial com Tubo de Impedância	47
4.5. Discussão de Resultados.....	61
5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

ABREVIATURAS

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

cm – Centímetro

dB – Decibel

Hz – Hertz

ITECONS - Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade

Map – Massa volúmica aparente (kg/m^3)

mm – Milímetro

Pa – Pascal

Pap – Porosidade aparente (%)

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

T – Tonelada

UE – União Europeia

α – Coeficiente de absorção sonora

1. INTRODUÇÃO

A poluição sonora é um problema que afeta cada vez mais a população, sendo um dos principais fatores de degradação da qualidade de vida dos cidadãos, em particular em meio urbano.

A variação dos níveis de ruído está diretamente relacionada com o atual crescimento das cidades, refletindo-se em várias fontes de ruído como os tráfegos rodoviário, ferroviário e aéreo, bem como as atividades comerciais e industriais.

O ruído, ainda que seja subjetivo, isto é, muito dependente da sensibilidade de cada um, é objetivamente um elemento que provoca variadíssimos efeitos prejudiciais à saúde humana e ao próprio meio ambiente, variando consoante a distância à fonte, a intensidade, bem como a sua duração ou frequência de ocorrência. É capaz de influenciar negativamente o bem-estar físico, mental e social do indivíduo exposto, particularmente dos grupos mais vulneráveis da população e, por isso, se justifica que a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) o defina como sendo “*um som desagradável*” (Valadas, et al., 2004).

Apesar de existirem outros tipos de ruído, neste estudo daremos especial relevância ao ruído ambiente, o qual pode ser definido como o “*ruído global observado numa dada circunstância num determinado instante, devido ao conjunto de fontes sonoras que fazem parte da vizinhança próxima ou longínqua do local considerado*” (Decreto-Lei n.º9/2007 de 17 de janeiro).

No que diz respeito à gestão de resíduos pode afirmar-se, por sua vez, que a sustentabilidade ambiental tem cada vez mais importância no nosso quotidiano. No caso da construção, os impactos ambientais são de grande relevância pois, para além da elevada quantidade de gases prejudiciais à saúde, existe uma quantidade de resíduos provenientes da construção que são de difícil reaproveitamento, permanecendo em vazadouros e, conseqüentemente, contribuindo para a poluição (Canha da Piedade, 2000).

Evoluir no sentido de um desenvolvimento sustentável, entendido como a satisfação das necessidades do presente sem sacrificar as possibilidades de as gerações futuras virem a satisfazer as suas próprias (Canha da Piedade, 2000), exige uma gestão mais eficaz dos resíduos. Ora, o setor da construção não é, nem pode aliás ser, alheio a essa preocupação, uma vez que se trata de um setor de atividade com elevada quota de responsabilidade ambiental e social, já que, para além da poluição que os RCD geram, este é responsável por um grande desperdício de recursos naturais.

É neste contexto que este trabalho se enquadra, sendo o objetivo primordial desta dissertação formular e caracterizar uma solução acústica com a incorporação de materiais granulares porosos provenientes de resíduos, abordando-se o aproveitamento de vários tipos de resíduos na construção, com ênfase na área do comportamento mecânico e acústico.

O agregado principal de betão que é objeto deste trabalho é um resíduo proveniente de escórias da incineração de resíduos sólidos urbanos, disponibilizado pela *ValorSul*. É com base neste material que se desenvolve todo o estudo, recorrendo a várias composições de agregados, de várias dimensões, com objetivo de estudar formulações com um coeficiente de absorção sonora suficientemente bom para se considerar “apto” a ser utilizado na construção de barreiras acústicas, tão necessárias no mercado.

1.1. Motivação

A consciência e crescente preocupação com questões ambientais que é patente no mundo atual torna imprescindível que a sociedade adote medidas capazes de reverter e prevenir o elevado consumo de recursos e, conseqüentemente, a cada vez maior produção de resíduos. Sendo o setor da construção um dos que em muito contribui para o avolumar do problema, torna-se essencial e premente que este seja também parte da solução, o que passa, desde logo, pela capacidade de reutilização dos seus próprios RCD através do desenvolvimento de soluções que os incorporem.

Além disso, hoje em dia há também uma cada vez maior preocupação com a saúde pública e com o conforto da população no seu quotidiano. Ora, a poluição sonora é apontada como uma das grandes variáveis que influenciam negativamente a qualidade de vida das pessoas, especialmente nos meios urbanos.

Dito isto, resumiu-se a motivação que nos fez encetar no estudo e procura de novas soluções acústicas com incorporação de resíduos, utilizando-se na caracterização e formulação das soluções de atenuação sonora apresentadas, os materiais granulares porosos provenientes da incineração de resíduos sólidos urbanos.

1.2. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo principal aprofundar o conhecimento sobre o comportamento acústico de soluções que reutilizam materiais granulares porosos provenientes de resíduos, desta feita diminuindo os impactes ambientais associados e procurando utilizá-las na produção de barreiras acústicas.

Com este intuito principal, podemos considerar os seguintes objetivos específicos:

- Caracterização física e mecânica de misturas de ligantes hidráulicos com agregados provenientes de escórias da incineração de resíduos sólidos urbanos;
- Produção de amostras de materiais granulares porosos;
- Avaliação experimental do desempenho acústico conferido pelas amostras de material poroso.

1.3. Estrutura da Dissertação

A dissertação está estruturada em seis capítulos, cada um dividido em subcapítulos.

Começa-se por um capítulo introdutório, onde se expõe o enquadramento necessário ao tema e se especificam os seus objetivos.

No segundo capítulo, realiza-se uma breve revisão do estado da arte. Procurando consolidar-se o trabalho já efetuado nesta área, avaliam-se soluções acústicas para aplicação no exterior, materiais fibrosos e porosos, incorporação de resíduos em soluções acústicas, tentando desta forma ter a perceção do contributo deste estudo na evolução do tema.

No terceiro capítulo – Materiais granulares porosos com incorporação de resíduos –, abordamos as características do material poroso que estamos a estudar, caracterizando a matéria-prima e as diversas formulações estudadas e, posteriormente através de ensaios, a caracterização física e mecânica da mistura e suas conclusões.

No quarto capítulo, são abordados de forma breve alguns conceitos -chave do comportamento acústico, nomeadamente a velocidade do som, a equação de onda, a impedância característica do meio e a absorção sonora. É referido o ensaio do tubo de impedância realizado para caracterizar a mistura quanto à sua absorção sonora, em amostras de reduzidas dimensões. Ainda neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais para a determinação do coeficiente de absorção sonora, com recurso ao método do tubo de impedância, segundo a respetiva norma europeia em vigor para a realização dos mesmos. Por último, analisam-se, retirando-se as devidas conclusões, os ensaios realizados.

No derradeiro capítulo, o quinto, apresentam-se as conclusões retiradas do estudo e são dadas algumas sugestões para investigações relacionadas com o tema a realizar futuramente.

2. ESTADO DA ARTE

Porque a preocupação não é de hoje e já outros deram passos largos nesta caminhada, procurou-se pesquisar e comparar os trabalhos e documentação existentes sobre o tema em estudo.

Esta secção, como foi dito anteriormente, tem exatamente o objetivo de dar a conhecer, em "pinceladas" necessariamente gerais, alguns estudos que acabaram por ser a nossa base de trabalho, deixando para as secções seguintes as análises decorrentes dos mesmos.

2.1. Soluções Acústicas para Aplicação Exterior

A crescente preocupação com temas relacionados com acústica tem feito "eco" na iniciativa tecnológica e, como tal, não é de estranhar que nesta área tenham, nos últimos anos, surgido evoluções tecnológicas de monta. De facto, muitos investigadores e empresas especializadas na área, têm contribuído para o desenvolvimento de soluções capazes de atenuar o ruído nos diversos meios.

Para o meio exterior, onde são essencialmente os transportes e as atividades industriais os maiores emissores de ruído, têm-se desenvolvido várias soluções para tentar absorver o ruído produzido, diminuindo a poluição sonora.

A propagação do som passa por 3 etapas: a geração pela fonte, a propagação através do meio e a receção pelo destinatário. Tendo esta noção como premissa, as soluções desenvolvidas passam por uma intervenção numa ou em mais destas etapas, com o intuito de conseguir uma redução significativa no ruído (Watts, 2002).

As barreiras acústicas são um dos métodos mais usuais para a atenuação do ruído no exterior, principalmente no que respeita ao ruído do tráfego rodoviário (Figura 2.1).

Estas barreiras atuam no meio de propagação, localizando-se entre o emissor e o recetor, e a sua composição física e a sua forma têm uma grande influência na eficiência que apresentam.

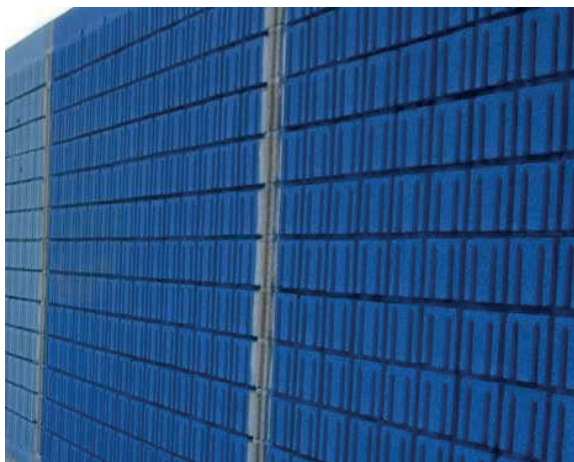


Figura 2.1 - Barreiras acústicas em betão numa aplicação para atenuação do tráfego rodoviário
(fonte:<https://www.leca.pt/aplicacoes/infraestruturas/barreiras-acusticas/>).

As barreiras simples atuam impedindo a propagação direta do som e provocando a reflexão do som.

Por se considerar uma solução com atenuações baixas, mas com aplicação corrente trata-se de um tipo de produto que tem sido bastante estudado e alvo de investimentos consideráveis.

Porém, com a incorporação de materiais capazes de absorver a parte do som incidente com frequência compatível com o material, as barreiras absorventes são capazes de promover uma atenuação sonora adicional de 8 dB (Bies e Hansen, 2003). Ou seja, o desempenho destas barreiras é muito condicionado pelo tipo de material usado, e pelas suas propriedades absorventes, sendo também influenciado pela frequência do som incidente e pela sua configuração, nomeadamente no que se refere à altura, geometria e posicionamento das mesmas (Watson, 2006).

Uma outra opção é o tratamento do ruído no recetor. Entre as várias soluções existentes, o tratamento através das fachadas dos edifícios tem sido um dos pilares na investigação e são várias as soluções que têm surgido para aplicação nas fachadas, que resultam na absorção do ruído exterior.

O conforto acústico dos edifícios é, aliás, objeto de regulamentação legal e tal imposição reforça a necessidade de se investir neste isolamento; veja-se a este propósito o disposto no Decreto-Lei nº.96/2008 de 9 de junho: “*compatibilização com as disposições do RGR, em especial as relativas ao isolamento sonoro das fachadas dos edifícios localizados em zonas próximas de vias de tráfego e definidas como sensíveis, e ao isolamento sonoro das fachadas de novos edifícios a construir em zonas urbanas consolidadas, para as quais não é possível, de imediato, cumprir os valores limite de exposição, nos termos previstos no n.º 7 do artigo 12.º do RGR.*”

A Figura 2.2, permite observar esquematicamente como a propagação das ondas sonoras opera quando estas incidem nas fachadas de edifícios paralelos, tornando evidente a necessidade de um tratamento capaz de atenuar esta propagação.

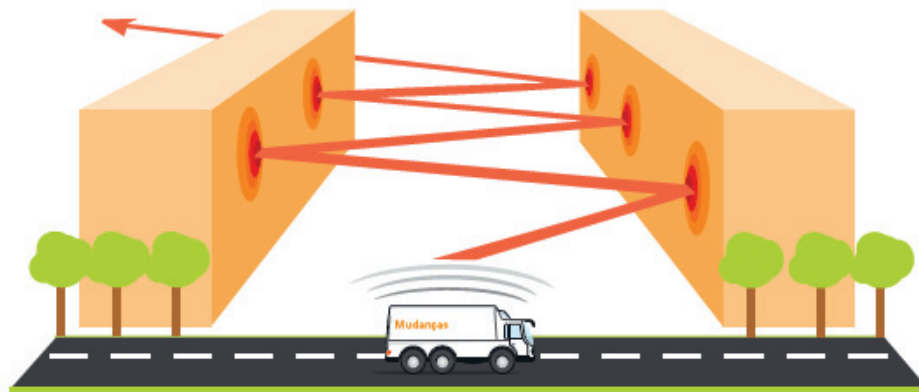


Figura 2.2 - Demonstração da forma como o ruído invade as fachadas e os espaços livres quando não tem obstáculos à sua propagação (Valadas, B., & Leite, M. J., 2004).

Nas fachadas de edifícios, apesar de o ruído exterior se transmitir para o interior dos edifícios essencialmente através das janelas, uma vez que, normalmente, os materiais que as constituem possuem um baixo índice de isolamento acústico quando comparado com as paredes exteriores ou coberturas, existe um cuidado para que estas cumpram os requisitos legais.

Este tratamento das fachadas de edifícios é feito através de soluções construtivas (Figura 2.3). E, tendo em conta a literatura da especialidade, as estratégias mais eficazes para aumentar o isolamento a sons aéreos passam, por exemplo, por uma duplicação dos elementos de separação e o aumento de massa.

Segundo Oliveira de Carvalho (2008), com o afastamento entre os elementos construtivos da parede dupla, é possível obter valores de atenuação acústica de +6 dB. Este autor refere também que é uma boa prática construtiva usar panos de espessuras diferentes para que as frequências de coincidência de cada caso não se sobreponham, considerando tal prática fundamental em elementos leves ou de pequena espessura, como, por exemplo, os vidros duplos, que não devem ter dois com espessuras iguais. A colocação de material absorvente sonoro na caixa de ar contribui também para o aumento da atenuação sonora, contudo este não deve ser colocado a unir os dois panos.

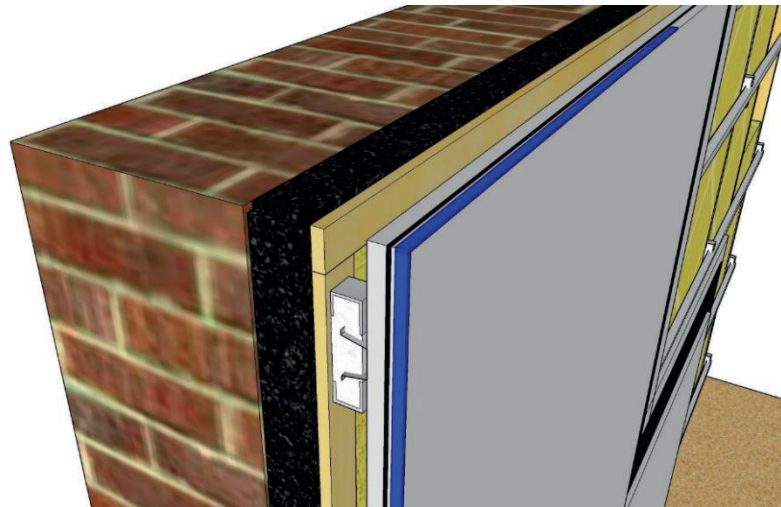


Figura 2.3 - Projeto de uma parede dupla com alvenaria, isolamento acústico, caixa de ar e gesso cartonado (fonte: fabiomazzeu.com).

Tendo Patrick Blanc como pioneiro, em 1988, as fachadas verdes são outra solução construtiva para atenuação de ruídos (Figura 2.4).

Atualmente utilizadas em todo o mundo, estas têm sido aprimoradas ao longo do tempo e novas e melhores soluções têm surgido, permitindo registrar diferentes comportamentos, tanto acústico como térmico.

No que se refere à absorção acústica, são várias as variáveis que interferem no resultado, de entre as quais as mais importantes e significativas para o estudo são o substrato utilizado, a vegetação escolhida e a humidade do solo desse sistema. Assim, a vegetação assume um papel muito importante nas bandas das frequências mais altas (acima dos 1000 Hz), devido à dispersão do som pelas folhagens. Já o substrato é determinante para a absorção do ruído nas frequências mais baixas (de 250 Hz a 500 Hz) (Davis et al., 2017)

De acordo com os trabalhos realizados no ITECONS, pode afirmar-se que este tipo de solução tem um enorme contributo na absorção sonora, desde que a vegetação seja dispersa e exista substrato em contacto com o ambiente, sendo também variáveis determinantes o tipo de vegetação, o substrato que a constitui, a sua espessura, o teor de humidade e do nível de compactação.

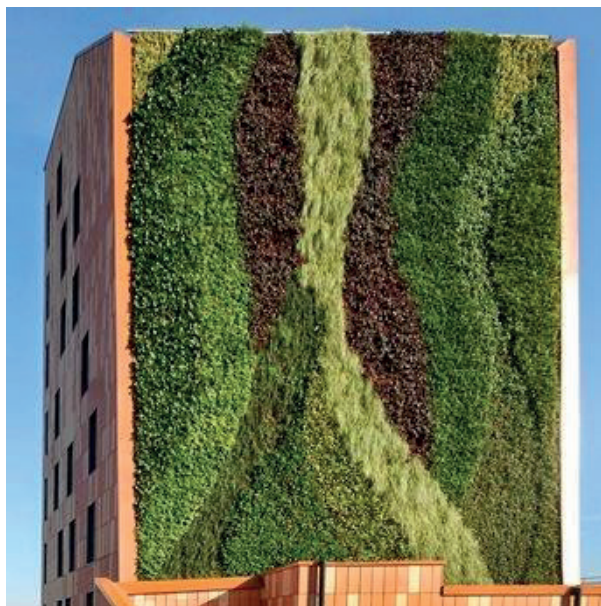


Figura 2.4 - Fachada verde em edifício residencial em Digby Road, Inglaterra (fonte: <http://www.arteeblog.com/2014/05/fachada-verde-edificio-residencial.html>).

Por fim, podemos tratar o ruído através da fonte, sendo disso exemplo a incorporação de pavimentos granulares porosos nas vias de tráfego rodoviário. Com esta incorporação consegue-se, incrementando propriedades relacionadas com a porosidade, a produção de pavimentos de baixo ruído e, assim, influenciar a produção do mesmo (Figura 2.5).

Atualmente as superfícies mais silenciosas são as que têm um coeficiente de porosidade maior ou as de textura fina. Nos estudos elaborados pelo Europeu SILVIA (SilendaVia – Sustainable Road Surface for Traffic Noise Control), concluiu-se que as camadas de superfície silenciosa, quando aplicadas adequadamente, são muito favoráveis, tendo sido registadas reduções de ruído de cerca de 3-5 dB(A) em relação a uma superfície de referência. De notar que 3 dB corresponde a sensivelmente uma redução do tráfego para metade. Contudo, como referiu Nilsson et al. (2005), existirá um decréscimo da redução do ruído ao longo do tempo fruto do desgaste do próprio piso.



Figura 2.5 - Aspeto do asfalto: DA - Asfalto denso e PA - Asfalto drenado (Freitas, E., Pereira, P., de Picado-Santos, L., & Santos, A., 2009).

2.2. Materiais Fibrosos ou Porosos

Os avanços tecnológicos, aliados à preocupação ambiental, têm feito surgir novos materiais, muitos dos quais provenientes da reciclagem e reutilização dos resíduos, fazendo aparecer materiais fibrosos ou porosos de várias naturezas.

Este tipo de materiais são caracterizados por possuírem, para além de material sólido, pequenas cavidades cheias de ar com comunicação entre si e para o exterior. A existência dessas cavidades permite que haja uma aproximação da impedância do material à do meio. As variações de pressão resultantes da propagação das ondas sonoras no interior do material fazem com que a energia cinética, devido à resistência do ar durante a propagação, se dissipe em calor que é recolhido pela estrutura sólida, permitindo desta forma que haja uma absorção sonora (Tadeu et al., 2010).

Estes materiais, devido às suas características macroscópicas (designadamente: a porosidade, a tortuosidade e a resistência ao fluxo de ar), são muito utilizados em revestimento de superfícies com o objetivo de atenuação sonora no domínio das altas frequências (frequências superiores a 500Hz e 630Hz).

Os **materiais porosos** utilizados para fins de atenuação sonora podem ser classificados em: **celulares**, **fibrosos** e **granulares** (Figura 2.6).

Os **materiais porosos granulares**, por terem uma reduzida porosidade, têm particular relevância nas soluções de absorção sonora em ambiente exterior, podendo também ser utilizados em aplicações interiores (Arenas e Crocker, 2010; Mareze, 2013).

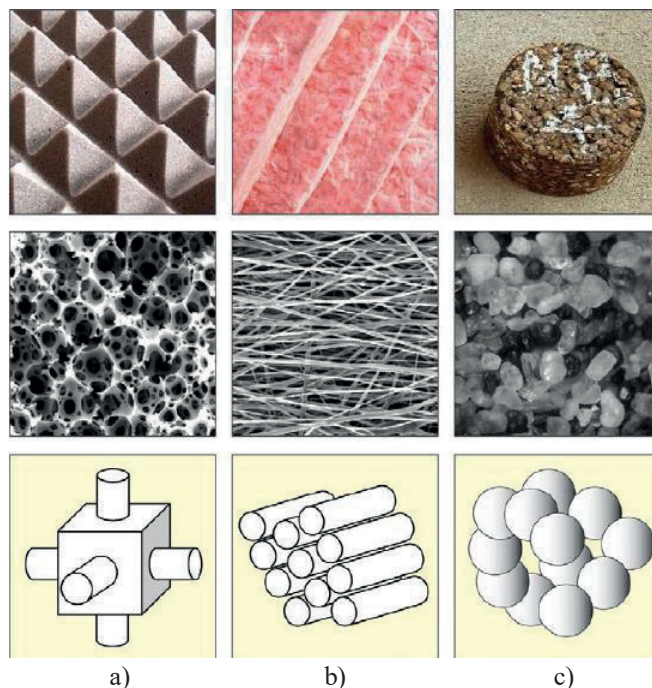


Figura 2.6 - Materiais porosos e suas microestruturas: a) material poroso celular; b) material poroso fibroso; c) material poroso granular (Arenas & Crocker, 2010).

Os **materiais porosos fibrosos** são compostos por uma combinação de fibras, naturais ou sintéticas, que retêm o ar nas cavidades entre elas. A massa volúmica deste material é muito relevante para definir o seu desempenho acústico, em geral, quanto mais baixo for esse valor, menor será a absorção. São exemplos de fibras sintéticas a lã de rocha e a lã de vidro; de fibras naturais, o algodão, o cânhamo, a fibra de coco e a *Kenaf*.

Já os **materiais porosos celulares** diferem na sua estrutura microscópica dos materiais porosos fibrosos. Nestes, existe uma estrutura complexa mais densa que permite a propagação do som e a consequente dissipação da energia pelas suas cavidades. Quanto mais fechada for a estrutura celular, mais reduzida será a absorção sonora. Materiais como espumas de poliuretano, poliuretano expandido e melamina são exemplos de materiais porosos celulares.

Estudos feitos com base neste tipo de materiais têm vindo a oferecer uma melhoria estética do compartimento onde estão inseridos sem que seja comprometido o seu desempenho acústico, oferecendo diferentes colorações e diferentes acabamentos superficiais. No caso de lãs minerais, obrigatoriamente têm que estar no tardo de um painel, uma vez que libertam micropartículas com efeitos nocivos para a saúde humana e, como tal, têm que estar devidamente isolados do ambiente interior do compartimento, através da colocação, por exemplo, de véus acústicos na superfície.

Os modelos teóricos do comportamento acústico deste tipo de materiais geralmente são enquadrados em duas categorias: aqueles que assumem um esqueleto rígido e aqueles que permitem o movimento do mesmo. Existem modelos simples, como o proposto por Delany e Bazley, que a partir de ensaios laboratoriais aos materiais fibrosos estabelecem relações empíricas para determinação da impedância acústica e do número de onda. Existem também modelos mais complexos e elaborados, como o modelo proposto por Frank Fahy, que partindo da determinação dos parâmetros físicos característicos dos materiais, chegam à equação de onda (Delany e Bazley, 1970; Fahy, 2003).

2.3. Incorporação de Resíduos em Soluções Acústicas

Num mundo cada vez mais populoso e consumista, a pressão e consumo excessivo de recursos não renováveis são problemas cada vez maiores, cuja solução ou atenuação é urgente.

O setor da construção, que acarreta e implica muitos problemas para o ambiente, designadamente no esgotamento de matérias-primas e impactes ambientais associados à produção de materiais de construção, tem necessariamente que tomar medidas por forma a ser uma atividade cada vez mais sustentável, e tal passa, por exemplo, pela substituição do uso de recursos não renováveis por recursos renováveis, bem como pela reutilização dos seus resíduos.

Como fica patente na Figura 2.7 o modelo económico circular, cuja consciência e importância é cada vez maior, assenta na redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia, desta feita substituindo o conceito de fim de vida da economia linear.

Este modelo é um catalisador para a competitividade e inovação e é com base nele que muitos estudos se têm desenvolvido, nomeadamente no setor da construção onde é premente desenvolver soluções que diminuam o impacte negativo da atividade neste mundo de recursos escassos e finitos.

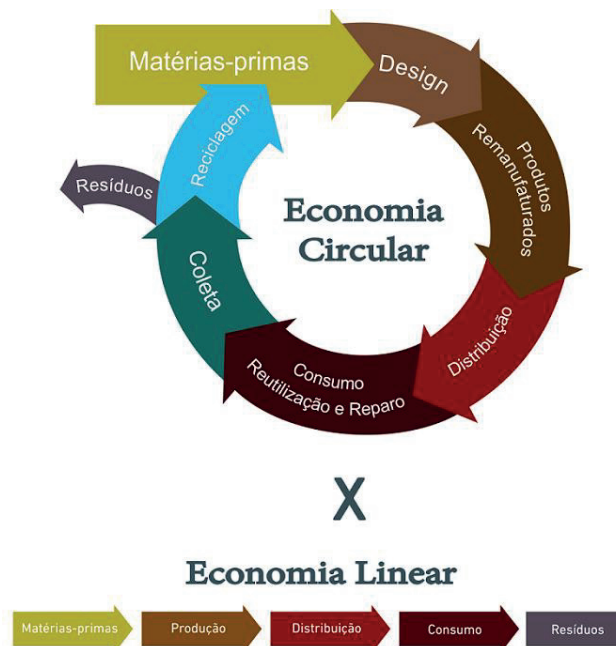


Figura 2.7 - Economia circular vs Economia linear (fonte: autossustentavel.com).

O Decreto-Lei nº 73/2011 de 17 de junho, documento que transpõe a Diretiva nº 2008/98/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, é claro quanto à necessidade de reduzir, reutilizar e reciclar resíduos.

Os termos são claros e não deixam margem para dúvidas: “O Governo considera prioritário reforçar a prevenção da produção de resíduos e fomentar a sua reutilização e reciclagem com vista a prolongar o seu uso na economia antes de os devolver em condições adequadas ao meio natural. Além disso, considera importante promover o pleno aproveitamento do novo mercado organizado de resíduos como forma de consolidar a valorização dos resíduos, com vantagens para os agentes económicos, bem como estimular o aproveitamento de resíduos específicos com elevado potencial de valorização.” Esta Diretiva, chega a fixar um valor de 70% de RCD para a reutilização, reciclagem e valorização.

Em acústica, várias soluções com incorporação de resíduos têm vindo a ser desenvolvidas e estudadas.

Existem no mercado soluções acústicas que recorrem à incorporação de vários tipos de resíduos e, na impossibilidade de uma nomeação exaustiva, serão seguidamente dados alguns exemplos dessas soluções estudadas e já implementadas na construção.

Assim, existem barreiras acústicas em betão com incorporação de resíduos de diversos tipos, desde resíduos industriais, a granulado de borracha de pneu triturado e até resíduos têxteis,

conseguindo com esse uso aliar a sustentabilidade ambiental com o benefício da sua utilização, já que a incorporação destes resíduos permite que aos painéis acresça um elevado valor de absorção sonora.

De modo a conferir um melhor desempenho acústico, a geometria dos painéis, a espessura e a geometria das nervuras são padronizadas tendo em conta estudos efetuados, mas trata-se de uma solução que não consegue competir economicamente com outros materiais utilizados na produção das barreiras acústicas, e o preço continua a ser um fator determinante de escolha de muitos clientes (Fernandes, F. (2018, 16 de janeiro)). Na Figura 2.8, podemos observar as barreiras e a sua aplicação.



Figura 2.8 - Barreira acústica em betão com incorporação de borracha (fonte: <https://www.jornaldenegocios.pt/negocios-iniciativas/detalhe/barreiras-acusticas-de-borracha-mais-eficazes>).

A utilização das fibras de coco na construção civil, segundo Castilhos (2011), é outro exemplo que traz várias vantagens: para além de ser um material sustentável e 100% natural, este material é um bom isolante ao som e tem uma boa e estável durabilidade (Figura 2.9).

Existem dois tipos de fibras de coco: a fibra castanha, que é extraída de cocos maduros; e a fibra branca, que é extraída de cocos verdes. Estas fibras, colocadas em aterros, demoram entre 8 a 12 anos para se decompor, o que acarreta problemas para o meio ambiente. Sendo produzidas anualmente cerca de 500 mil toneladas de fibras, este é um problema, que é essencial resolver e que levou estudiosos da área da construção a desenvolver soluções que permitam a sua reutilização e ainda representam uma mais valia para o setor.

Assim, com base em vários estudos que têm vindo a ser feitos, concluiu-se que o uso de fibras de coco na construção beneficia algumas propriedades das argamassas e betões, melhorando a sua resistência e durabilidade (Hwang et al, 2016).

O revestimento exterior do material fibroso do coco é constituído por 43% de celulose, 45% de lenhina e 4,9% de pectina. A elevada quantidade de lenhina é o componente que justifica a durabilidade da fibra (Silva *et al.*, 2012).



Figura 2.9 - Amostra de fibras de coco cortadas para a produção de argamassas (Silva *et al.*, 2012).

O cânhamo, para além de muitas utilizações que tem, e das várias aplicações no setor da construção civil, tem nas fibras exteriores do seu caule materiais com um bom desempenho na atenuação acústica e térmica e, como tal, é também utilizada como isolante (Kymalainen e Sjoberg, 2008)(Figura 2.10).

Este tipo de isolamento pode ser utilizado tanto em paredes como em pisos e coberturas. O seu processo de fabrico é simples, apenas consistindo na aglomeração das fibras, que são ligeiramente comprimidas (sem necessidade de acrescentar ligantes), sendo necessário prepará-las com um tratamento anti-fogo (Geiger @, 2013).

Apesar dos benefícios inequívocos e vantagens comparativas, inclusivamente em termos ambientais e de saúde humana, este tipo de produto não tem vingado no mercado pois o seu preço, quando comparado com o da lã de rocha, não lhe permite ser competitivo (Kymalainen e Sjoberg, 2008).



Figura 2.10 - Exemplo de isolamento em rolo de fibra de cânhamo (Geiger @, 2013).

António *et al.* (2018), procurando propor um novo material compósito para aplicações em construção incorporando resíduos, usaram nos seus estudos a casca de arroz (como subproduto da cultura de arroz), a borracha proveniente da reciclagem de pneus usados e a cortiça (de sobras do produto principal).

Nesses estudos, como podemos observar na Figura 2.11, a casca de arroz foi misturada com os grânulos de cortiça expandida e com grânulos de borracha em duas proporções (50/50 e 75/25). Para que esta fusão conseguisse ter efeitos práticos, foi adicionado um aglutinante de poliuretano à mistura. Após vários ensaios mecânicos e físicos, chegaram-se a resultados bastante interessantes: do ponto de vista acústico, o compósito com 50% de casca de arroz e 50% de borracha reciclada mostrou um coeficiente de absorção sonora máximo de 0,96 para a gama de frequência dos 100 Hz aos 5000 Hz, assim como uma redução ponderada do nível de pressão sonora de impacto, ΔL_w , que varia entre os 20 dB e os 27 dB dentro das várias misturas. Estes resultados, tornaram inequívoco que este tipo de soluções construtivas podem melhorar o desempenho térmico e acústico dos edifícios e, como tal, são opções a considerar.



Figura 2.11 - Diferentes compósitos produzidos e estudados a partir de resíduos de casca de arroz, borracha e cortiça (António *et al.*, 2018).

3. MATERIAIS GRANULARES POROSOS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS

Como temos vindo a enfatizar, a crescente e irremediável tónica com a preocupação com a sustentabilidade, por um lado, e a consciência dos impactos ambientais negativos da construção, por outro, têm vindo a incentivar as mais variadas iniciativas e estudos no sentido de reutilizar desperdícios, incorporando-os em várias soluções para a área. Com esse objetivo, realizámos alguns estudos no âmbito dos materiais granulares porosos, incorporando resíduos e analisando a sua eficiência na absorção sonora.

Neste capítulo, abordaremos todas as matérias primas por nós utilizadas, suas diferentes composições e os seus ensaios físicos e mecânicos.

3.1. Caracterização de Matérias-Primas

3.1.1. Ligante Hidráulico

Para a formulação do material granular poroso com características acústicas, e para que a mistura tenha alguma resistência estrutural, é necessário utilizar um ligante hidráulico e um agregado.

O ligante hidráulico utilizado foi o Cimento Portland de calcário CEM II/A-L 42, um produto com uma boa trabalhabilidade e com uma resistência mecânica superior ao convencional, capaz de dar uma componente estrutural, tanto à flexão como à compressão, às amostras e, consequentemente, ao produto fabricado. Trata-se de um produto que é comercializado obedecendo a características normalizadas, dispensando por isso qualquer ensaio laboratorial para este trabalho.

Devemos, contudo, observar algumas características do material, conforme especificado e padronizado na metodologia NP EN 197-1 (2012) - Cimento Parte 1: composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes, que as empresas fabricantes têm que cumprir. Neste caso, todos os dados da sua caracterização foram retirados da ficha técnica do produto.

Quanto à composição química:

Quadro 3.1 - Composição química do Cimento Portland CEM II/A-L 42,5R (Fonte: <https://secilpro.com/upload/documents/54872e907e5c5.pdf>).

Propriedades	Método do Ensaio	Valor Especificado
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

Quanto às características mecânicas, o único ensaio a que o cimento foi sujeito refere-se à resistência à compressão. O Quadro 3.2 e a Figura 3.1, retirados da ficha técnica do produto, são conclusivos quanto à resistência de compressão tendo em conta o período de cura.

Quadro 3.2 - Composição mecânica do Cimento Portland CEM II/A-L 42,5R (Fonte: <https://secilpro.com/upload/documents/54872e907e5c5.pdf>).

Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	Método de Ensaio
2 dias	7 dias	28 dias	NP EN 196-1
≥ 20 MPa	-	≤ 42,5 MPa e ≤ 62,5 MPa	

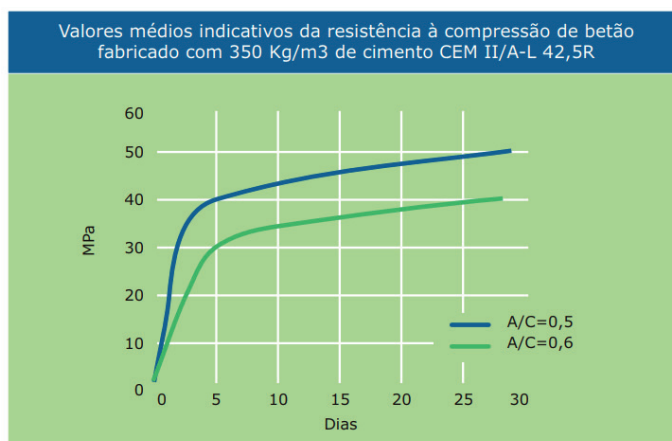


Figura 3.1 - Variação da resistência à compressão do Cimento Portland CEM II/A-L 42,5R com dias de cura (Fonte: <https://secilpro.com/upload/documents/54872e907e5c5.pdf>).

Por fim, no que toca à composição física, podemos observar no **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** quais as principais propriedades e valores.

Quadro 3.3 - Propriedades de Cimento Portland CEM II/A-L - 42,5R (Fonte: <https://secilpro.com/upload/documents/54872e907e5c5.pdf>).

Propriedades	Método do Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 60 min
Expansibilidade		≤ 10 mm

3.1.2. Resíduo

No contexto da presente dissertação, o agregado principal utilizado é um resíduo proveniente de escórias de incineração de resíduos urbanos, dispensado pela empresa ValorSul, S.A., que é a responsável pelo tratamento e valorização de cerca de 950 mil toneladas de resíduos urbanos produzidos por ano em 19 Municípios da Grande Lisboa e Região Oeste.

Numa das suas unidades, encontra-se uma Central de Tratamento e Valorização de Resíduos Sólidos Urbanos (CTRSU), que recebe os resíduos domésticos e produz, através da sua valorização energética, energia elétrica que é injetada na rede. De cada tonelada de resíduos incinerados resultam cerca de 200 kg de escórias, material que fica nos fornos após a combustão. Esse material é posteriormente triado, afinado e maturado, para que possa ser considerado e comercializado como sendo um produto de construção, tendo que cumprir determinados requisitos e características conforme especificado pela norma europeia EN 12620 (ValorSul @ (2019)).

A Figura 3.2 ilustra o agregado utilizado na produção das amostras e pretende mostrar a aparência do resíduo utilizado, sendo visível, nomeadamente, a olho nu, alguns vestígios de vidro e papel.

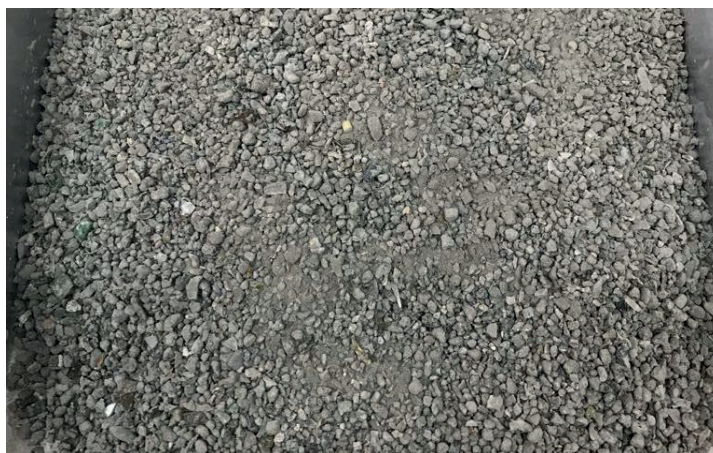


Figura 3.2 - Agregado utilizado como matéria-prima para a produção das amostras.

De forma a obter uma boa caracterização física do agregado utilizado como matéria prima das amostras, foi realizada uma campanha de ensaios laboratoriais.

A composição granulométrica tem grande importância nas propriedades das argamassas, possibilitando a determinação de algumas características físicas. A curva granulométrica, obtida através do método de peneiração, permite determinar as dimensões das partículas individuais e

estudar a sua distribuição. Esta caracterização apenas foi feita para a escória (Figura 3.3) e para a argila expandida (Figura 3.5).

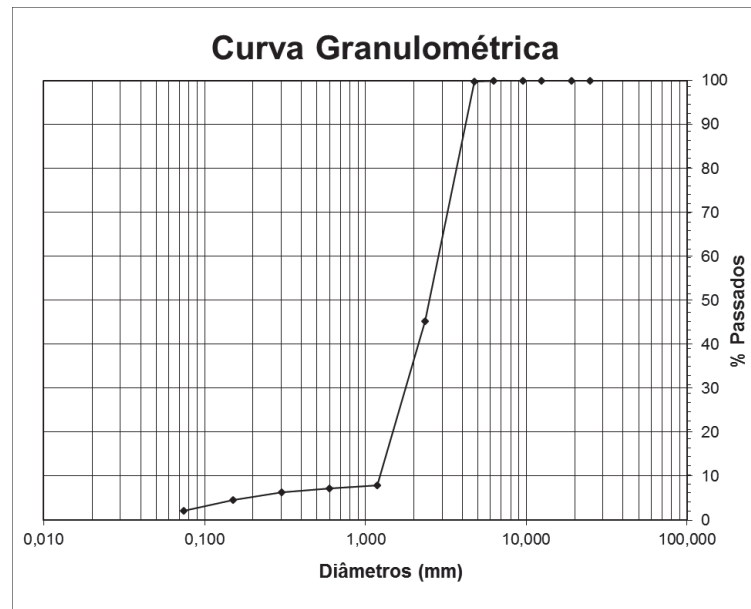


Figura 3.3 - Curva granulométrica do agregado de escória utilizado na produção das amostras.

Com a dimensão da abertura da malha dos peneiros (eixo das abcissas), e com a percentagem cumulativa do material que passa em cada peneiro (eixo das ordenadas) foi possível traçar a curva granulométrica de cada amostra a partir do peso retirado de cada peneiro. Pela análise da curva representada na Figura 3.3, é possível observar que a nossa amostra de escória possui uma elevada quantidade de material entre os 2,36 mm e os 1,18 mm, peneiros nº 8 e nº 16, respetivamente. É de notar também que existe uma elevada quantidade de partículas finas dos peneiros de dimensões menores, conferindo à nossa matéria prima uma maior capacidade de absorção de água e, conseqüentemente, uma menor porosidade.

Na Figura 3.4 podemos observar as várias formas e tamanhos e assim ter a percepção das quantidades de partículas após o ensaio de peneiração, realizado de acordo com a norma NP EN 933-1 (2014), para a obtenção da curva granulométrica.



Figura 3.4 - Quantidades do agregado de escória após a peneiração.

Uma outra característica, a massa volúmica das partículas de escória, foi determinada tendo em conta a metodologia especificada na norma EN 1015-6 (1998), que especifica e normaliza a metodologia do ensaio.

Assim, começou-se por determinar a massa do recipiente de volume conhecido (copo cilíndrico). Depois, encheu-se o copo cilíndrico com uma camada de resíduo, aproximadamente metade da sua capacidade e compactou-se. Prosseguiu-se do mesmo modo, enchendo o restante volume do recipiente e repetiu-se a compactação. Neste último enchimento foi necessário ter a certeza que o resíduo estava coincidente com o bordo superior do recipiente e que não possuía qualquer tipo de sujidade na superfície exterior do copo, obtendo-se a sua massa através da pesagem do conjunto.

Tendo em conta que a massa do resíduo é dada pela diferença entre a massa do conjunto, m_2 , e a massa do recipiente vazio, m_1 , a massa volúmica é determinada tendo em conta a seguinte equação:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.1)$$

em que:

ρ = massa volúmica (kg/m^3);

m_2 = massa do recipiente cheio de material (kg);

m_1 = massa do recipiente vazio (kg);

V = volume ocupado pelas partículas sólidas do material (m^3).

Assim obteve-se uma massa volúmica para o resíduo de escória, utilizado neste estudo, de aproximadamente, 2300 kg/m^3 . Este valor é muito idêntico ao de uma areia convencional, que se fixa entre os 2200 kg/m^3 e os 2500 kg/m^3 , fazendo com que a nossa argamassa tenha uma massa volúmica também elevada. Por esta razão, foi adicionada argila expandida para que fosse possível diminuir a respetiva massa volúmica.

Uma vez que se tratava de um resíduo e que não se sabia à priori o que é que continha, foi feito o ensaio de perda ao fogo tendo em conta a norma NP EN 196-2 (2006). Neste ensaio, é possível determinar o teor de materiais orgânicos aquando da queima do agregado a uma temperatura de $400 \text{ }^\circ\text{C}$, através da expressão:

$$Pf(\%) = \frac{M_i - M_f}{M_f} \times 100 \quad (3.2)$$

onde:

Pf – índice de perda ao fogo (%);

M_i – massa inicial do RCD (g);

M_f – massa final depois do aquecimento do RCD (g).

Tendo em conta a equação anterior, determinou-se um índice de perda ao fogo para o resíduo em causa de aproximadamente 4%, sendo possível concluir que este resíduo possuía uma baixa percentagem de matéria que se deteriora com a temperatura, nomeadamente, o plástico.

Por fim, de modo a ter um conhecimento total da caracterização do resíduo utilizado, a Universidade de Alicante elaborou o ensaio para a sua caracterização química, cujos resultados aqui se indicam a título informativo. Através deste ensaio, conseguimos saber quais os compostos químicos que constituem o dito resíduo.

Quadro 3.4 - Composição química do resíduo.

Composto:	Nome:	Teor (% em massa):
Na ₂ O	Óxido de sódio	4,8%
MgO	Óxido de magnésio	7,7%
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio	7,9%
SiO ₂	Dióxido de sílica	43,6%
CaO	Óxido de cálcio	21,1%
Fe ₂ O ₃	Óxido férrico	5,7%
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo	3,2%
Outros compostos		6,0%

Dos resultados obtidos no ensaio de caracterização química, apenas foram considerados os compostos com uma relevância maior, isto é, com um teor em massa maior do que 3%. Os compostos com uma elevada percentagem em massa são o SiO₂, vulgarmente conhecido por sílica, que é o principal composto do vidro e um dos óxidos mais abundantes na crosta terrestre, por exemplo na forma de areia, e o CaO, também conhecido habitualmente por cal. Todos os compostos constituintes do resíduo são compostos que não interferem com a sua durabilidade nem com o meio ambiente.

3.1.3. Argila Expandida 0-2

A argila expandida, um material granular poroso, foi utilizada para conferir à amostra uma massa menor, dado o peso volúmico que o resíduo possui, e também para promover uma diminuição do consumo de água uma vez que a presença de partículas de dimensões mais pequenas na escória diminuía a porosidade do material.

À semelhança do que foi feito com o agregado principal, na argila expandida também foi feita a análise da curva granulométrica para nos certificarmos das dimensões do elemento em estudo. A nossa análise confirmou a granulometria especificada na tabela técnica do material com a designação comercial 0-2.

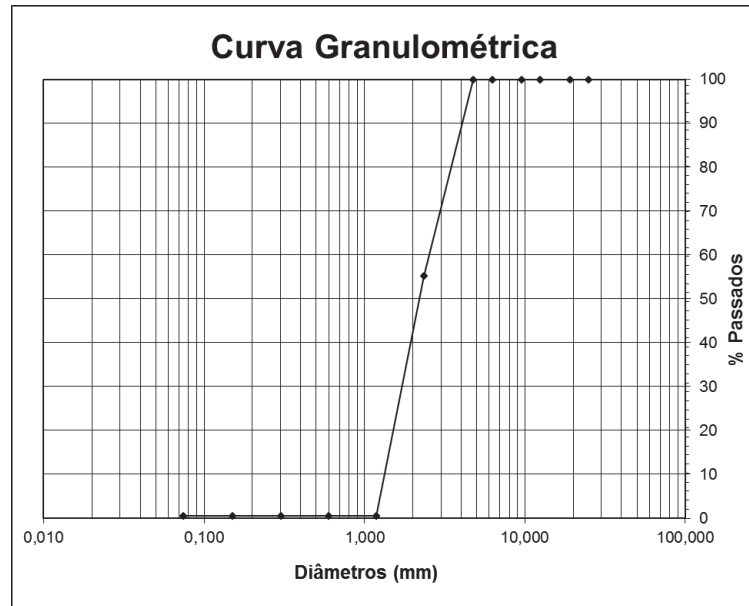


Figura 3.5 - Curva granulométrica da argila expandida utilizada na produção das amostras.

Sendo este um produto, à semelhança do cimento, padronizado e controlado, respeita as especificações que estão na respetiva ficha técnica, a qual transpomos em relação às suas propriedades no Quadro 3.5. Pela análise do referido quadro, podemos concluir que os valores obtidos na campanha de ensaios realizados são idênticos aos valores padronizados.

Quadro 3.5 - Características mecânicas e físicas da Argila Expandida ARGEX 0-2 (Fonte: http://argex.pt/documentos/FichaTecnica_Argex_0_2.pdf).

Propriedades	Valor Declarado	Unidades
Classes granulométricas reais	0,25 – 2,0	mm
Densidade aparente seca	550	(±15%) kg/m ³
Superfícies esmagas e partidas	N.A	(% massa)
Resistência ao esmagamento	7,7	MPa
Condutibilidade térmica	0,11	(W/m.°C)
Absorção de água	27,3	(% massa seca)
Resistência ao fogo	Incombustível Euro Classe A1	-

Por fim, com um papel fundamental para a produção das amostras com as características porosas que desejávamos, a água conferiu à mistura a capacidade de agregação e hidratação necessárias.

3.2. Desenvolvimento de Formulações de Composições

Para prosseguir como objetivo do nosso estudo, a caracterização das amostras quanto ao coeficiente de absorção sonora, foram produzidas amostras com várias composições de matérias primas e com diferentes formas; assim os resultados são mais específicos aquando da comparação com o modelo teórico e quando é feita a caracterização mecânica das mesmas.

Optou-se por produzir amostras cilíndricas para a obtenção do coeficiente de absorção sonora com duas espessuras diferentes, de 4 cm e de 6 cm, medidas realistas utilizadas neste tipo de soluções acústicas. Ao mesmo tempo, de modo a obter valores para a caracterização mecânica das amostras, produziram-se provetes de dimensão 4 cm x 4 cm x 16 cm, para os ensaios à flexão, e provetes de 4 cm x 4 cm x 4cm, para ensaios à compressão, referidos no Capítulo 3.3.

Tendo em conta todas as matérias primas que possuíamos para a formulação das amostras, partimos para duas composições diferentes. Inicialmente, com um traço em peso de 1:4:0,5, foram produzidas três amostras e logo percebemos que teríamos que ajustar o traço devido à falta de porosidade e à quantidade de ligante que as amostras demonstravam, a olho nu, quando estavam nos moldes. Foi então ajustado o traço em peso para 1:6:0,9, e com esta alteração conseguiram-se amostras com uma formulação próxima do esperado.

Além de diferentes composições de cimento e de resíduo, combinámos na amassadura a argila expandida, em percentagem variável, tendo a seguinte designação: Rxxx – Percentagem de resíduo e Axxx – Percentagem de argila expandida 0-2. Partiu-se de uma amassadura de referência (R100A000), e progressivamente foi-se substituindo o resíduo por igual volume de argila expandida. Para se distinguir as amostras dentro de cada grupo, designamos por 1 e 2 as amostras de espessura de 4 cm, e por 3 e 4 as amostras de 6 cm.

No Quadro 3.6 e no Quadro 3.7 apresentam-se, atendendo aos vários traços, as quantidades em peso das matérias-primas utilizadas em cada amassadura para as diferentes composições de resíduo e argila expandida, determinadas tendo em conta os valores das respetivas massas volumicas de cada matéria prima utilizada.

Quadro 3.6 - Composições em peso das amostras para um traço de 1:4:0,5.

	R100A000		R050A050		R000A100	
	Peso (kg)	Traço	Peso (kg)	Traço	Peso (kg)	Traço
Cimento Portland CEM II/B-L 42,5R	0,600	1,0	0,600	1,0	0,600	1,0
Resíduo	2,400	4,0	1,200	2,0	0,000	0,0
Argila Expandida 0-2	0,000	0,0	0,159	0,3	0,318	0,5
Água	0,300	0,5	0,300	0,5	0,300	0,5

Quadro 3.7 - Composições em peso das amostras para um traço de 1:6:0,9.

	R100A000		R070A030		R050A050		R000A100	
	Peso (kg)	Traço	Peso (kg)	Traço	Peso (kg)	Traço	Peso (kg)	Traço
Cimento Portland CEM II/B-L 42,5R	0,450	1,0	0,450	1,0	0,450	1,0	0,450	1,0
Resíduo	2,700	6,0	1,890	4,2	1,350	3,0	0,000	0,0
Argila Expandida 0-2	0,000	0,0	0,107	0,2	0,179	0,4	0,355	0,8
Água	0,400	0,9	0,225	0,5	0,225	0,5	0,225	0,5

O processo de amassadura das amostras de betão foi efetuado de acordo com a norma EN 1015-2 (1998), com o auxílio da misturadora e da placa vibratória ilustradas na Figura 3.6.

A matéria-prima foi pesada com a ajuda de uma balança de precisão de 0,1 g, tendo sido colocada na tina da misturadora. Com a misturadora a funcionar, foi colocada a água pré-determinada, através de um copo graduado. Contudo, dada a elevada quantidade de “finos”, recorreremos a uma placa vibratória para que esta fosse capaz de libertar a água existente dos poros, conferindo à argamassa a consistência desejada após uma nova mistura. Durante este processo, com o auxílio de uma colher de pedreiro, mexeu-se várias vezes a tina para que se conseguisse misturar os materiais acumulados no fundo.



Figura 3.6 – Misturadora mecânica (a) e a placa vibratória (b) utilizadas na produção das amostras de betão.

Os moldes foram previamente montados, limpos e pincelados com óleo descofrante em todas as suas faces, para se conseguir posteriormente desmoldar sem danificar os provetes.

Os provetes prismáticos destinaram-se apenas aos ensaios de resistência mecânica (flexão e compressão), enquanto os provetes cilíndricos serviram para os ensaios físicos e acústicos, nomeadamente, os de absorção sonora, porosidade e massa volúmica. No capítulo seguinte, são descritos e analisados os dados dos referidos ensaios.

Na Figura 3.7 -a) é possível visualizar um conjunto dos diferentes tipos de provetes utilizados, bem como as diversas alturas dos provetes cilíndricos. Esses provetes foram realizados com o auxílio de um tubo em PVC, cortados com uma serra circular à medida pretendida, 4 cm e 6 cm, e em seguida colocados e selados num suporte.

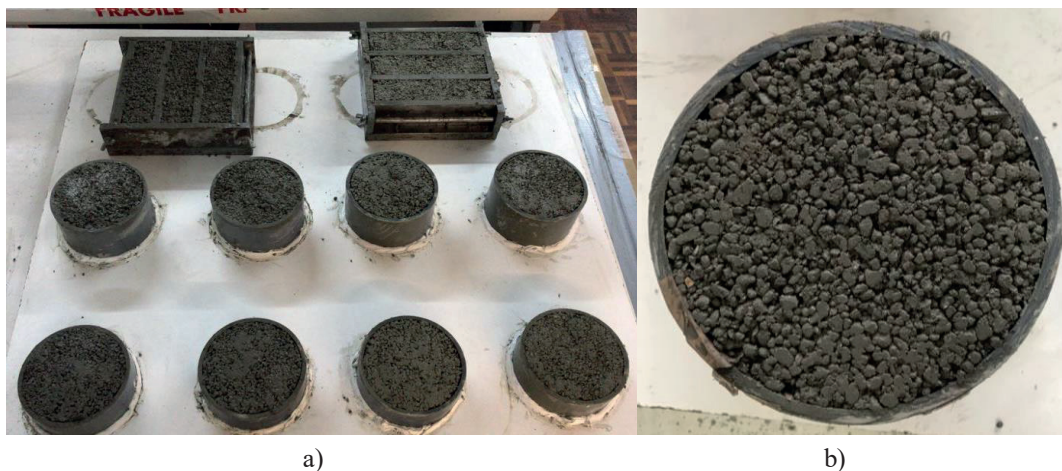


Figura 3.7 - a) Provetes cilíndricos e prismáticos após o enchimento da mistura de betão, b) Aspeto superficial da mistura de betão após o enchimento.

3.3. Caracterização Mecânica e Física

Para uma boa caracterização das amostras e, conseqüentemente, do produto final, o conhecimento das propriedades dos materiais que as compõem é de extrema importância, conseguindo a priori obter dados relevantes para o processo de fabrico, como referido na secção 3.1.

Após a realização dos ensaios de caracterização física das matérias-primas, quando as amostras já possuíam o tempo de cura necessário e assim todas as suas características bem definidas e desenvolvidas, partimos para a caracterização física e mecânica das mesmas.

As amostras cilíndricas produzidas, após o ensaio para determinação da massa volúmica, foram colocadas na estufa de secagem por um período de 12h, a uma temperatura de $50\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ e com uma humidade relativa de 10%. Assim, garantimos que todas elas ficassem isentas de qualquer teor de água na sua estrutura, conseguindo desta forma que a massa fosse constante e minimizando a margem de erro no ensaio de absorção de água e/ou porosidade (Figura 3.8). Quando secas, as amostras foram colocadas a arrefecer à temperatura ambiente e pesadas (m_2). Em seguida, as amostras foram submersas em água durante 24h para garantir a saturação nas mesmas.



Figura 3.8 - Amostras na estufa de secagem.

Feitas as manobras descritas, executaram-se as pesagens. Na Figura 3.9, podemos observar a pesagem hidrostática realizada, onde se colocou cada uma das amostras, já previamente saturadas, num suporte totalmente submerso e suspenso numa balança de precisão, conseguindo assim obter o valor da massa em imersão (m_3) com uma margem de erro muito reduzida. Logo de seguida, extraiu-se a amostra da imersão e, com o auxílio de um pano absorvente, limpam-se as superfícies, eliminado o excesso de água e pesando a amostra para avaliar a massa saturada (m_1).



Figura 3.9 – Pesagem hidrostática das amostras.

O cálculo da porosidade aparente (P_{ap}) e da massa volúmica aparente (M_{ap}) foi determinado através das equações (3.3) e (3.4), respetivamente:

$$P_{ap} (\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (3.3)$$

$$M_{ap} (kg/m^3) = \frac{m_2}{m_2 - m_3} \times 1000 \quad (3.4)$$

em que:

m_1 – Massa da amostra saturada (g);

m_2 – Massa da amostra seca (g);

m_3 – Massa da amostra em imersão (g).

Na Figura 3.10 até à Figura 3.12 e no Quadro 3.8 pode observar-se os valores da porosidade de cada amostra com respetiva média e desvio padrão por espessura (provetes 1-2 com espessura de 4 cm e os provetes 3-4 com espessura de 6 cm). No Quadro 3.9 pode observar-se os valores da porosidade e da massa volúmica, com as respetivas médias e desvio padrão para cada grupo de amostras, conseguindo desta forma ter uma análise dos dados com elevado rigor.

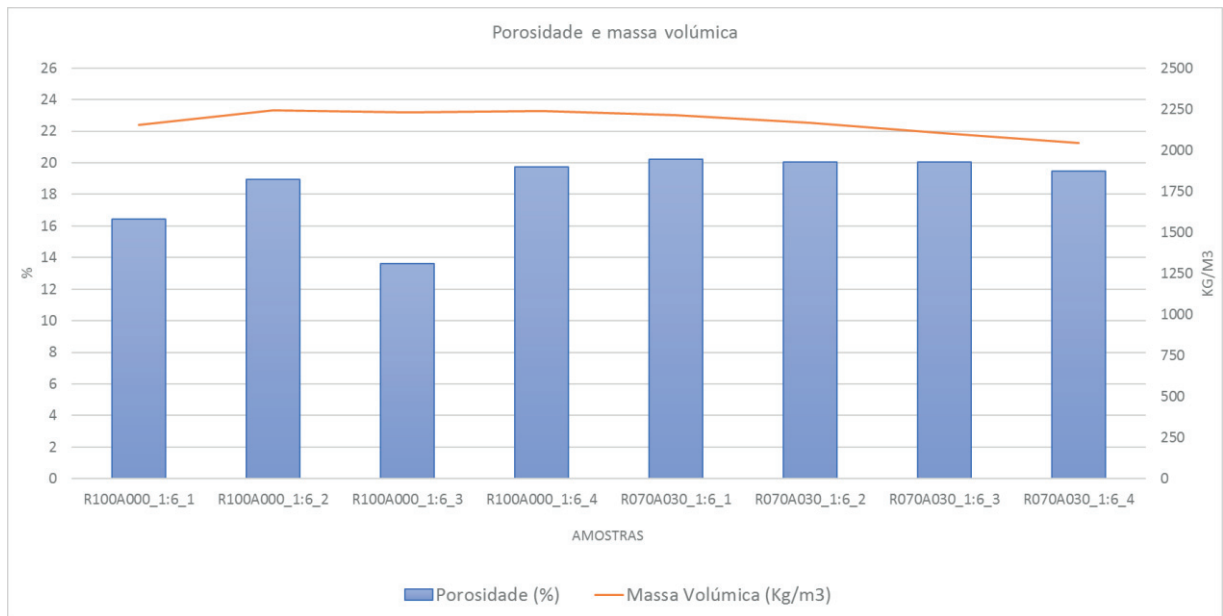


Figura 3.10 - Gráfico da porosidade aparente e massa volúmica aparentes para as amostras de R100A000 e R070A030 com o traço 1:6 em peso.

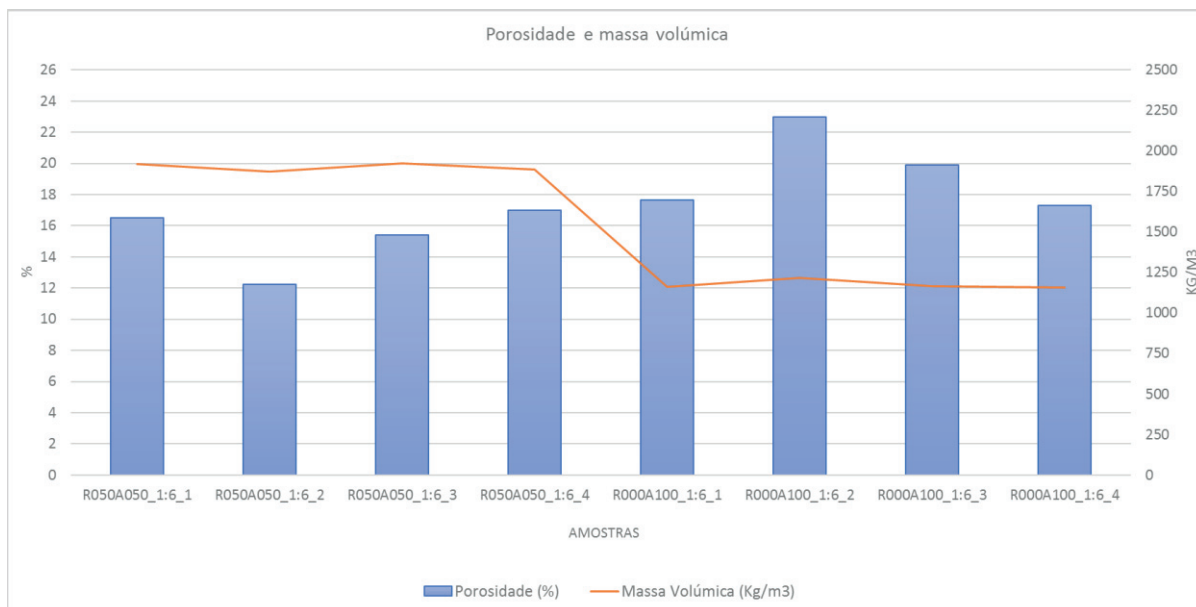


Figura 3.11 - Gráfico da porosidade aparente e massa volúmica aparentes para as amostras de R050A050 e R000A100 com traço 1:6 em peso.

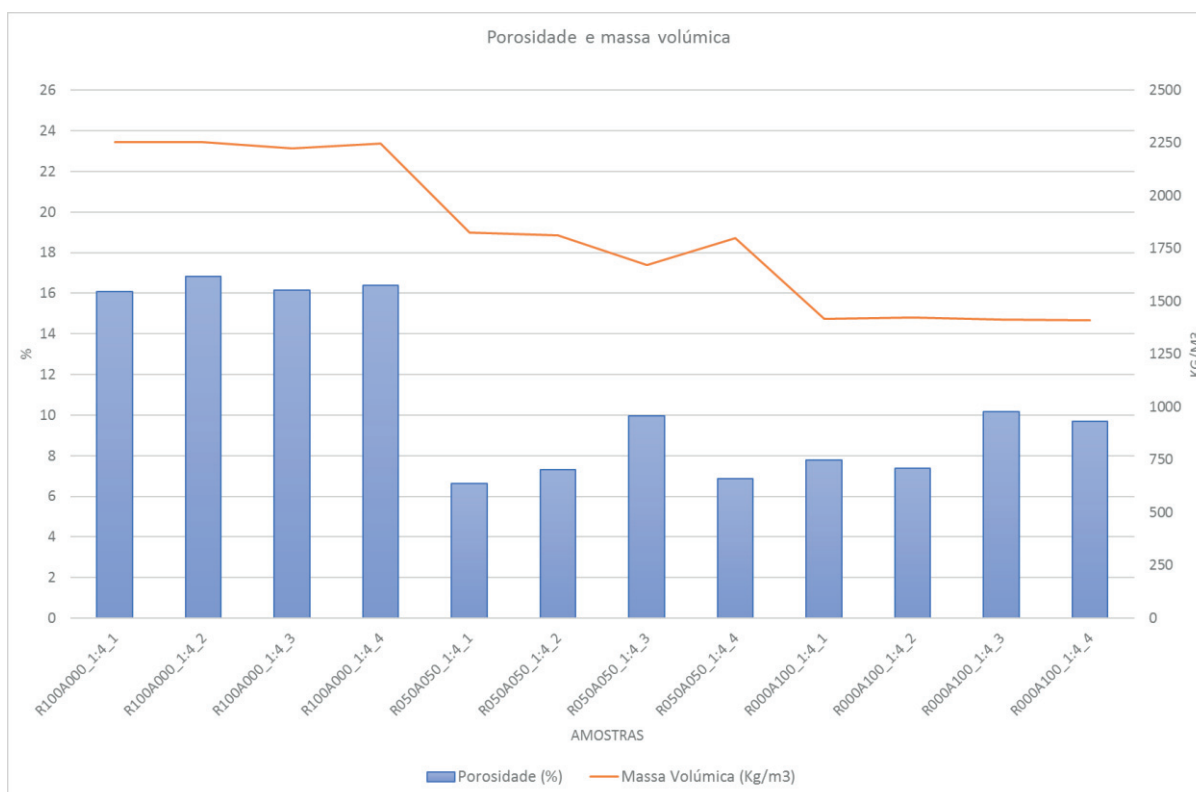


Figura 3.12 - Gráfico da porosidade aparente e massa volúmica aparentes para as amostras de R100A000, R050A050 e R000A100 com traço 1:4 em peso.

Quadro 3.8 - Valores da porosidade aparente de cada amostra e respetiva média e desvio padrão por espessura (provetes 1-2 com espessura de 4cm e provetes 3-4 com espessura de 6 cm).

Designação:	Porosidade (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)
R100A000_1:6_1	16,45	17,69	1,24
R100A000_1:6_2	18,93		
R100A000_1:6_3	13,62	16,69	3,07
R100A000_1:6_4	19,76		
R070A030_1:6_1	20,21	20,13	0,08
R070A030_1:6_2	20,05		
R070A030_1:6_3	20,06	19,77	0,29
R070A030_1:6_4	19,48		
R050A050_1:6_1	16,49	14,37	2,12
R050A050_1:6_2	12,25		
R050A050_1:6_3	15,39	16,20	0,81
R050A050_1:6_4	17,01		
R000A100_1:6_1	17,63	20,30	2,67
R000A100_1:6_2	22,98		
R000A100_1:6_3	19,89	18,59	1,31
R000A100_1:6_4	17,28		
R100A000_1:4_1	16,10	16,47	0,37
R100A000_1:4_2	16,83		
R100A000_1:4_3	16,16	16,28	0,12
R100A000_1:4_4	16,40		
R050A050_1:4_1	6,63	6,97	0,34
R050A050_1:4_2	7,31		
R050A050_1:4_3	9,96	8,41	1,55
R050A050_1:4_4	6,86		
R000A100_1:4_1	7,78	7,58	0,20
R000A100_1:4_2	7,38		
R000A100_1:4_3	10,17	9,93	0,24
R000A100_1:4_4	9,69		

Quadro 3.9 - Valores da massa volúmica aparente de cada amostra com respetiva média e desvio padrão por espessura (provetes 1-2 com espessura de 4 cm e provetes 3-4 com espessura de 6 cm).

Designação:	Massa volúmica (kg/m ³)	Média (kg/m ³)	Desvio Padrão (kg/m ³)
R100A000_1:6_1	2155,04	2199,33	44,29
R100A000_1:6_2	2243,62		
R100A000_1:6_3	2230,82	2234,94	4,12
R100A000_1:6_4	2239,05		
R070A030_1:6_1	2214,76	2191,35	23,41
R070A030_1:6_2	2167,94		
R070A030_1:6_3	2101,57	2072,71	28,86
R070A030_1:6_4	2043,85		
R050A050_1:6_1	1918,50	1895,86	22,64
R050A050_1:6_2	1873,22		
R050A050_1:6_3	1925,44	1906,47	18,98
R050A050_1:6_4	1887,49		
R000A100_1:6_1	1160,21	1187,38	27,17
R000A100_1:6_2	1214,55		
R000A100_1:6_3	1167,19	1161,40	5,80
R000A100_1:6_4	1155,60		
R100A000_1:4_1	2253,40	2254,38	0,98
R100A000_1:4_2	2255,35		
R100A000_1:4_3	2225,40	2236,80	11,40
R100A000_1:4_4	2248,20		
R050A050_1:4_1	1824,19	1818,78	5,42
R050A050_1:4_2	1813,36		
R050A050_1:4_3	1670,57	1735,54	64,98
R050A050_1:4_4	1800,52		
R000A100_1:4_1	1417,10	1421,09	3,99
R000A100_1:4_2	1425,08		
R000A100_1:4_3	1413,68	1411,82	1,86
R000A100_1:4_4	1409,95		

A análise do Quadro 3.8, onde estão registados os valores da percentagem de porosidade de cada amostra e a respetiva média para cada grupo de espessura, deixa claro que as amostras de traço em peso de 1:4 podem vir a ter resultados muito reduzidos aquando da análise de absorção sonora, uma vez que possuem uma porosidade mais baixa; já em relação ao traço em peso de 1:6, dado que os valores são muito idênticos entre as várias formulações, uma análise da percentagem de porosidade tendo em conta as várias composições não permite de forma conclusiva aferir sobre os resultados do seu comportamento acústico. Contudo, é possível afirmar que amostras com a mesma composição, apesar de terem espessuras diferentes, possuem uma percentagem de porosidade muito idêntica.

A observação dos dados permite verificar que os valores da massa volúmica não variam significativamente com as diferentes espessuras, mas sim com a composição das amostras. Como seria de esperar, a massa volúmica das amostras diminui com a presença de maior percentagem de argila na sua composição, tendo uma quebra bastante acentuada quando comparada com a composição de 100% argila (R000A100).

No que respeita à caracterização mecânica, como referido anteriormente, foram ensaiados provetes à compressão e à flexão, de modo a analisar o seu comportamento e as suas propriedades em determinadas condições a que o produto final estará sujeito.

Quanto ao ensaio à compressão, foram estudados 3 provetes (4 cm x 4 cm x 4 cm) de cada referência, por forma a fazer uma análise mais representativa, passível de prever e diminuir a margem de erro a que este tipo de ensaio está sujeito. O ensaio foi efetuado a uma velocidade de 0,20 kN/s, com auxílio de uma prensa hidráulica com capacidade de aplicação de carga de 10T, conforme podemos verificar na Figura 3.13, e de um dispositivo capaz de transmitir a carga da prensa à amostra. Estes ensaios obedeceram à metodologia descrita na Norma NP EN 12390-3 (2009).



Figura 3.13 - Prensa hidráulica de 10T utilizada nos ensaios mecânicos de compressão e flexão.

De um modo geral, podemos afirmar que o ensaio de compressão corresponde à aplicação de um esforço axial que tende a provocar um encurtamento ou a rotura do corpo submetido a esse esforço. Através destes ensaios é possível observar num diagrama tensão-deformação o comportamento mecânico da peça ensaiada, tendo em conta o aumento da tensão aplicada. Pela análise desse mesmo diagrama, podemos concluir que o nosso material, como seria expectável, é um material frágil. A rotura do material dá-se praticamente na fase elástica.

No Quadro 3.10, pode-se observar os valores da força de rotura utilizada para cada grupo de amostras, o ensaio termina quando o provete atinge a rotura, sendo posteriormente convertida em tensão (através da equação 3.5). Neste mesmo quadro, de modo a diminuir eventuais erros provenientes da produção das amostras e da elaboração do ensaio, foi feita a respetiva média aritmética e calculado o desvio padrão de cada grupo de amostras.

A tensão de rotura é determinada através do quociente entre a força de compressão “P”, no momento da rotura em N, e “A” a área da secção onde está apoiado o provete, em mm² (neste caso 1600 mm²) através da equação 3.5.

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (3.5)$$

Quadro 3.10 - Valores do ensaio à compressão, com a respetiva média e desvio padrão do grupo.

Designação:	Força de rotura (kN)	Tensão de rotura (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
R100A000_1:6_1	2,44	1,53	1,76	0,17
R100A000_1:6_2	3,00	1,88		
R100A000_1:6_3	3,03	1,89		
R070A030_1:6_1	5,33	3,33	3,26	0,07
R070A030_1:6_2	5,07	3,17		
R070A030_1:6_3	5,24	3,28		
R050A050_1:6_1	6,59	4,12	3,54	0,44
R050A050_1:6_2	5,56	3,48		
R050A050_1:6_3	4,86	3,04		
R000A100_1:6_1	13,65	8,53	9,01	1,06
R000A100_1:6_2	12,84	8,03		
R000A100_1:6_3	16,76	10,48		
R050A050_1:4_1	25,03	15,64	16,23	0,42
R050A050_1:4_2	26,29	16,43		
R050A050_1:4_3	26,59	16,62		
R000A100_1:4_1	16,15	10,09	9,85	0,47
R000A100_1:4_2	16,43	10,27		
R000A100_1:4_3	14,70	9,19		

Uma breve análise dos dados, permite concluir que o traço em peso de 1:4, ou seja, com uma maior quantidade de ligante hidráulico e menor quantidade de resíduo, tem valores de tensão à compressão mais elevados do que as amostras de traço em peso de 1:6. Estes resultados eram expectáveis, considerando a existência de uma maior quantidade de ligante hidráulico.

Dentro de cada traço, os grupos de amostras no traço em peso de 1:6 apresentam maior resistência quanto à percentagem de argila expandida na sua composição. No traço em peso de 1:4, esse mesmo resultado verifica-se na ordem inversa, ou seja, quanto maior a percentagem de resíduo maior a resistência.

Na Figura 3.14, é visível o estado da amostra antes da aplicação da carga e a rotura da mesma quando aplicada a carga máxima a que a peça resistiu. O instrumento utilizado serviu para que a carga aplicada fosse centralizada na face do cubo.

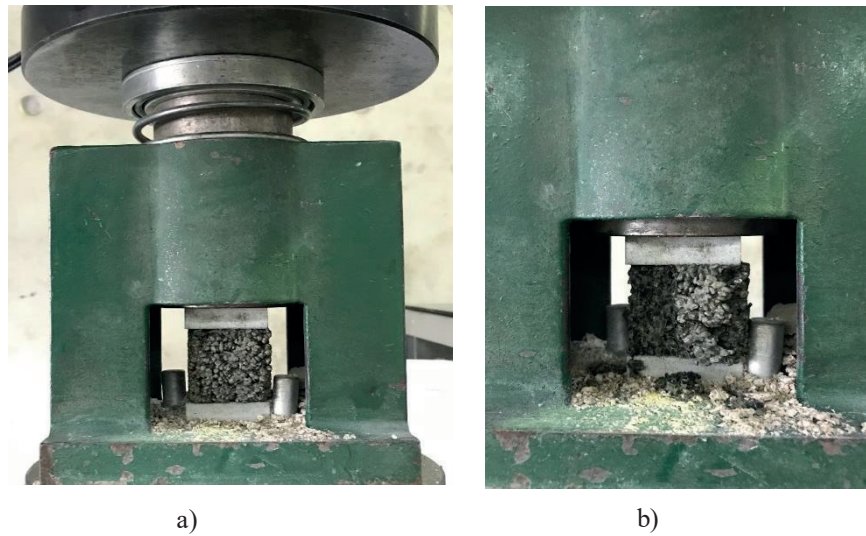


Figura 3.14 - a) Ensaio de compressão antes da aplicação do carregamento; b) Amostra na fase de rotura após a aplicação do carregamento.

Finalmente, realizou-se o ensaio à flexão, feito apenas para dois grupos de amostras de traço em peso de 1:4, já que tal ensaio não era fundamental para a análise do comportamento do produto final.

Como referido, as amostras apresentaram dimensões de 16 cm x 4 cm x 4 cm, sendo possível que se consiga uma análise das tensões no provete idênticas à que ocorrerão no produto final. O ensaio foi elaborado na mesma prensa hidráulica já referido, a uma velocidade de 0,0055 kN/s, num dispositivo com 2 apoios com a carga aplicada em 2 pontos, para possibilitar uma diminuição das tensões de contacto e uma maior exposição da região ao momento fletor máximo. Este ensaio foi feito em concordância com a Norma NP EN 12390-5 (2009).

Este ensaio consiste na aplicação de uma carga crescente nos quatro pontos da barra bi apoiada em materiais frágeis, e a monitorização do valor da carga máxima e da deflexão da amostra são feitas em regime elástico. Com a realização do ensaio com o provete apoiado em quatro pontos, como podemos verificar nas figuras seguintes, o momento fletor entre os apoios internos é constante sendo que, neste intervalo, apenas atuam tensões de tração e de compressão na secção transversal.

Quadro 3.11 - Valores do ensaio à flexão, com a respetiva média e desvio padrão do grupo.

Designação:	Força de rotura (kN)	Tensão de rotura (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
R050A050_1:4_1	0,88	0,50	0,47	0,06
R050A050_1:4_2	0,67	0,38		
R050A050_1:4_3	0,89	0,51		
R000A100_1:4_1	1,27	0,73	0,69	0,05
R000A100_1:4_2	1,26	0,72		
R000A100_1:4_3	1,07	0,61		

Neste caso, a tensão de rotura à flexão é dada pela expressão seguinte:

$$\sigma = \frac{3P \cdot a}{bh^2} \quad (3.6)$$

sendo σ a tensão de rotura à flexão em N/mm², “P” a força de tração por flexão no momento da rotura em N, “a” a distância entre o apoio interno e o apoio externo em mm, e “b” e “h” as dimensões da base e altura do provete, também em mm.

A partir da análise do Quadro 3.11 fica claro que as amostras têm valores de resistência à flexão muito inferiores quando comparadas com a resistência das mesmas à compressão. De qualquer modo, ao invés do que se verificou no ensaio à compressão, neste, quanto maior a percentagem de resíduo, menor é o valor da resistência à flexão. Este resultado pode dever-se ao facto de a porosidade para a amostra R050A050_1:4 ser superior à R000A100_1:4, ficando assim com uma menor capacidade de resistir a momentos fletores.

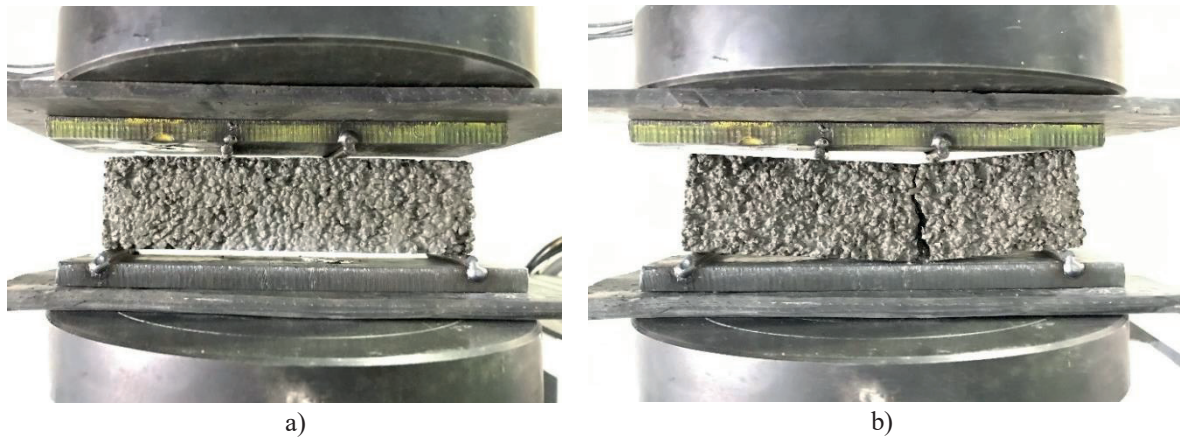


Figura 3.15 - a) Ensaio de flexão com apoio de 4 pontos antes da aplicação do carregamento; b) Amostra na fase de rotura após o carregamento.

Na Figura 3.15, estão patentes os quatro pontos de apoio onde a carga foi aplicada no provete e o estado da amostra antes e depois da rotura.

3.4. Discussão de Resultados

A porosidade, parâmetro muito importante na análise acústica das amostras, foi calculada pelo ensaio especificado no subcapítulo anterior, tendo sido possível antecipar alguns resultados preliminares a respeito da avaliação do material para absorção sonora. Os dados vieram reforçar, e confirmar, a nossa previsão de que as amostras com o traço em peso 1:4, devido à quantidade excessiva de ligante hidráulico e de água, não seriam adequados para o estudo, pois a sua porosidade é reduzida. Esta análise é conclusiva, válida para todas as espessuras, na medida em que a espessura da amostra não influencia o parâmetro em causa, uma vez que cada tipo de composição possui uma porosidade idêntica.

No ensejo de conseguir um estudo mais preciso e completo, foi feito o cálculo da massa volúmica aparente, que nos veio ajudar a ter a perceção do peso do material por unidade de volume e assim auxiliar a determinar as dimensões ideais para a produção do material. Dessa análise resulta que os valores são dependentes da composição das amostras, quanto maior a percentagem de resíduo, maior a sua massa volúmica aparente. Estas observações também são expectáveis, uma vez que o resíduo é substituído por um agregado leve, a argila expandida.

Na campanha de ensaios realizados para o estudo do material à compressão, foi possível concluir que as amostras de traço em peso de 1:4, têm valores da tensão à compressão mais elevados

do que as amostras de traço 1:6, o que se deve ao facto de estas possuírem uma maior quantidade de ligante hidráulico.

O aumento da resistência dá-se, nas amostras de traço em peso de 1:6, quando a composição destas tem uma percentagem maior de argila incorporada. Sendo que o agregado de resíduo utilizado, como se aproxima muito de uma areia convencional, não tem resistência quando comprimido. Com uma quantidade de ligante hidráulico superior, as amostras de traço em peso 1:4, verificam as mesmas conclusões na ordem inversa, isto é, têm uma resistência maior com uma percentagem menor de argila na sua composição. Como a porosidade dessas amostras é menor, e estas têm um aspeto mais compacto e robusto, a sua resistência é substancialmente superior às restantes.

No que respeita ao ensaio e resistência à flexão, tal apenas foi realizado para as amostras de traço em peso de 1:4, uma vez que o mesmo não se revela fundamental para a análise global do produto. Efetuado tendo em conta as especificações mencionadas anteriormente e respeitando as exigências europeias, foi possível observar que, comparativamente aos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão, neste ensaio as amostras tiveram desempenho com resultados substancialmente inferiores. Concluímos que a resistência à presença de momentos fletores nas amostras é bastante condicionada pela percentagem de resíduo e, conseqüentemente, pela porosidade. Ou seja, quanto maior a percentagem de resíduo e a porosidade, menor é a resistência à flexão.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ABSORÇÃO SONORA DOS MATERIAIS GRANULARES

Para que haja um melhor entendimento de todas as matérias abordadas no decorrer do documento, enunciam-se em seguida, de forma breve, alguns dos conceitos gerais de acústica. Depois, para dar a conhecer o principal ensaio experimental realizado para a caracterização das amostras de material para barreiras acústicas, apresenta-se a sua metodologia e composição. Após a abordagem de toda a metodologia necessária, é feita a caracterização e discussão dos resultados da absorção sonora das amostras de material granular em estudo. Com o intuito de avaliar qual a melhor solução, tanto em termos de composição material como geométrica, do ponto de vista da absorção sonora, foi feito um estudo detalhado para as diferentes espessuras e para as diferentes composições.

4.1. Conceitos Gerais de Propagação do Som

Ao ser libertada por uma fonte sonora, a energia sonora transfere perturbações ao meio de propagação (gasoso, líquido ou sólido), modificando o estado, nomeadamente através de variações da pressão, da massa específica e da temperatura. Sendo o objeto de estudo neste trabalho o meio gasoso, o som pode ser definido como uma variação de pressão produzida por uma fonte, transmitida através de um meio de propagação e detetada pelo ouvido recetor (Tadeu *et al.*, 2010).

4.1.1. Velocidade do Som

A velocidade de propagação do som é descrita pelo deslocamento das partículas que constituem o meio, dependendo por isso, das propriedades físicas do meio através do qual se propaga o som. Assim, este é um parâmetro fundamental para se descrever analiticamente a onda sonora.

A equação (4.1), que se segue, é um modelo simplificado para o cálculo da velocidade do som (c), em que esta depende da temperatura do meio.

$$c = 20,1 \cdot \sqrt{\frac{273 + T}{d}} \quad (4.1)$$

onde:

c – velocidade do som (m/s)

T – temperatura (°C);

d – densidade do meio gasoso, em relação ao ar.

Para o meio gasoso, o ar, nosso meio de estudo, em condições normais, considerando uma temperatura de 20 °C e uma pressão atmosférica normal, a velocidade do som é de 344 m/s. Neste caso, a propagação das ondas é realizada longitudinalmente, ou seja, as partículas movimentam-se no sentido da direção da propagação da onda uma vez que é desprezada a dissipação de energia (Tadeu *et. al.*, 2010).

4.1.2. Equação de Onda

A propagação do som direto entre uma fonte e um determinado recetor, pode ser descrita matematicamente, tendo em conta as Leis da Física que relacionam as grandezas acústicas, pela equação de Helmholtz ou de onda,

$$\nabla^2 \cdot p = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (4.2)$$

onde:

c – velocidade do som (m/s);

p – pressão sonora (Pa);

t – tempo (s);

∇ – operador laplaciano.

Em meios fluidos, a equação de onda permite a representação de pequenas perturbações, podendo ser escrita em coordenadas cartesianas para cada ponto no espaço e no tempo. Através dela consegue-se também relacionar a variação de pressão relativa à pressão normal do ambiente (Patrício, 2008)

4.1.3. Impedância Característica do Meio

A impedância característica do meio relaciona a pressão sonora com a velocidade das partículas do meio numa onda plana, independente da frequência.

$$Z_c = c \cdot \rho_0 = \frac{p}{v} \quad (4.3)$$

onde:

Z_c – impedância acústica do meio (Ns/m³);

c – velocidade do som (m/s);

ρ_0 – densidade do meio (kg/m³);

p – pressão sonora (Pa)

v – velocidade da partícula do meio (m/s).

Para uma pressão atmosférica normal e a temperatura do ar de 20 °C, esta propriedade do meio toma o valor de 416 N.s/m³. (Vigran, 2008).

Uma vez que o amortecimento do som, se caracteriza pela diminuição da pressão sonora com o aumento da distância à fonte, e este, não depende apenas do tipo de fonte emissora e da superfície confinante onde o som se propaga, depende igualmente das características do meio de transmissão. Deste modo, torna-se imperativo o conhecimento da impedância do meio para a caracterização sonora de qualquer material (Tadeu *et. al.*, 2010).

4.1.4. Absorção Sonora

A absorção sonora é caracterizada pela dissipação da energia incidente (energia sonora) na superfície exposta de um material. Essa dissipação é feita em energia refletida, energia transmitida e energia absorvida pelos materiais, dependendo da natureza das superfícies, do ângulo de incidência das ondas sonoras e das condições de aplicação do material absorvente. Todos os materiais absorvem energia sonora em maior ou em menor quantidade, sendo, por isso, importante saber quais escolher para dotar determinado local de uma boa qualidade acústica.

Assim, podemos concluir que o coeficiente de absorção sonora de um elemento é maior quanto maior for a energia dissipada. A equação que se segue, estabelece o equilíbrio da energia do elemento.

$$E_i = E_r + E_t + E_a \quad (4.4)$$

onde:

E_i – energia incidente;

E_r – energia refletida;
 E_t – energia transmitida;
 E_a – energia absorvida pelo materiais.

Dividindo ambos os termos da expressão por E_i , tem-se que:

$$1 = \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_t + E_a}{E_i} \quad (4.5)$$

onde:

$E_t + E_a$ – energia não refletida.

Sendo a intensidade de uma onda plana proporcional ao quadrado da pressão sonora, a intensidade refletida é menor do que a incidente num fator de $|R^2|$. Como o coeficiente de reflexão R é um valor complexo, temos:

$$\frac{E_r}{E_i} = |R^2| \quad (4.6)$$

Assim, o coeficiente de absorção sonora é dado por:

$$\alpha = 1 - |R^2| \quad (4.7)$$

Em suma, existe absorção total quando o coeficiente α é igual a um ($\alpha = 1$) e absorção nula quando é igual a zero ($\alpha = 0$).

Com o conhecimento deste parâmetro acústico dos materiais, torna-se possível fazer uma correta seleção dos mesmos tendo em conta a sua finalidade (Ribeiro, 2018).

4.2. Ensaio em Tubo de Impedância

O ensaio em tubo de impedância foi o principal ensaio experimental realizado nesta dissertação para a caracterização dos diversos parâmetros das barreiras acústicas. Utilizando amostras de dimensões muito mais reduzidas do que os painéis das barreiras acústicas, mas replicando a sua composição, acabamento e espessura, é possível chegarmos aos valores da absorção sonora e calcular os diversos parâmetros acústicos necessários para a sua caracterização.

O tubo de impedância está dotado, numa das extremidades, da ligação a um amplificador e de um altifalante; na outra extremidade, situa-se a amostra e, ao longo do tubo, em posições normalizadas, existem dois microfones, como podemos observar na Figura 4.1.

De acordo com os procedimentos definidos na norma EN ISO 10534-2 (1998), utilizou-se um amplificador e um altifalante colocados numa das extremidades do tubo, emitindo um ruído de intensidade média e constante ao longo do espetro de frequências (ruído branco). As ondas sonoras, ao incidirem sobre a amostra, são registadas como variações de pressão resultantes de uma quantidade de energia refletida e outra não refletida, determinadas pela absorção da pressão sonora. As flutuações de pressão são registadas pelos dois microfones que, como assinalado, estão localizados em posições predefinidas ao longo do tubo de impedância. Os sinais sonoros recolhidos pelos microfones são processados e tratados por um analisador que, posteriormente, permite determinar os valores da absorção sonora na gama de frequência do som a analisar e a validar para o tubo de impedância utilizado.

Em conformidade com a referida norma, utilizou-se um tubo de impedância, elaborado em aço, com diâmetro interior de 10 cm, e um amplificador, do tipo 2716C, da marca Brüel & Kjaer. A aquisição dos sinais foi feita por dois microfones, G.R.A.S. 46AE 1/2" CCP, espaçados de 5 cm, respeitando a norma citada e usou-se um sistema multianalisador NI USB 4431, da marca National Instruments. De acordo com a mesma norma, o primeiro microfone foi colocado à distância de 25 cm da face da amostra. Os dados recolhidos foram analisados e interpretados em bandas de 1/3 de oitava para uma melhor compreensão do desempenho acústico do sistema de painel acústico (Ribeiro, 2018).

No decorrer do trabalho, tendo em conta a norma EN ISO 10534-2 (1998), a campanha de ensaios laboratoriais foi feita no tubo de impedância com dois microfones e o cálculo da absorção sonora das amostras na gama de frequências entre os 100 Hz e os 1600 Hz.

Respeitando a norma de ensaio, no início de cada campanha de medições, foram realizadas duas medições preliminares. Na primeira, mediu-se o nível sonoro no interior do tubo com a fonte ligada e com a fonte desligada, verificando a diferença entre eles, que deve ser superior a 10 dB ao longo de toda a gama de frequências. Na segunda, ensaiou-se com uma amostra de referência, muito absorvente, primeiro com os microfones numa ordem e depois com eles na ordem inversa. Seguindo este procedimento, torna-se possível anular o erro de fase dos microfones.



Figura 4.1 – Equipamento utilizado no método do tubo de impedância, para determinação da absorção sonora de materiais.

4.3. Caracterização e Descrição das Amostras

Com o objetivo de avaliar o desempenho acústico de amostras de material poroso granular, estabeleceram-se, como descrito atrás, várias configurações, fazendo variar a composição do agregado da amostra e a espessura das mesmas.

Em laboratório, os ensaios foram elaborados com duas amostras de cada composição (traço e espessura). As amostras ensaiadas são aproximadamente uniformes em toda a sua espessura, tendo sido ensaiadas em ambos os topos (A e B) para que conseguíssemos uma análise mais aproximada do real, já que, no fabrico dos painéis de barreiras acústicas, assim como na sua produção em laboratório, um topo B estará sujeito a cofragem, tendo por isso um acabamento distinto (onde foi aplicada vibração manual) do outro e um maior número de cavidades porosas (Figura 4.2). Posto isto, para a avaliação do desempenho acústico cada amostra foi ensaiada com cada topo voltado para o interior do tubo de impedância.

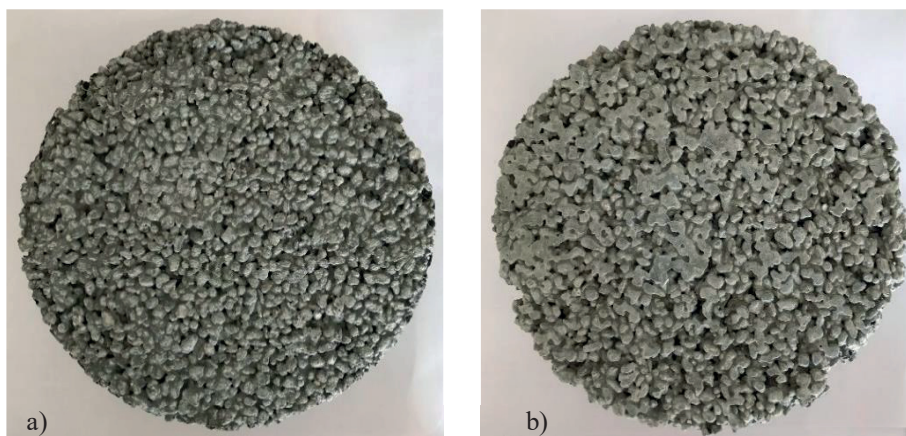


Figura 4.2 – Ilustração de uma amostra do betão em estudo, com acabamentos diferenciados: a) topo A da amostra; b) topo B da amostra.

Através das várias combinações de agregados, espessura e da análise de ambos os topos, chega-se a uma campanha de 166 ensaios experimentais realizados. Com este número de ensaios, três para cada combinação, é possível diminuir os erros laboratoriais, tornando as medições mais representativas e assim de responder aos objetivos propostos, tirando as devidas conclusões, de forma mais segura e correta.

Nesta fase do estudo, apenas foi acrescentado ao “código” utilizado para a identificação das amostras, exposto na secção 3.2, a identificação de cada topo. Considerou-se o topo “A” como sendo a superfície da amostra livre, sujeita ao contacto aquando da compactação manual e que, por isso, apresenta uma porosidade menor; e o topo “B” que, quando descofrado, possui uma superfície mais regular e porosa.

4.4. Resultados do Ensaio Laboratorial com Tubo de Impedância

Nesta secção estão patentes todas as representações gráficas resultantes dos ensaios elaborados no tubo de impedância. Nos gráficos das curvas de absorção sonora apresentados, para uma fácil compreensão dos resultados obtidos, é possível observar a variação do coeficiente de absorção sonora em função da frequência. Neste tipo de ensaio, conforme explicado atrás e como indicado na norma internacional EN ISO 10534-2 (1998), apenas foi possível observar a gama de frequências entre os 100 Hz e os 1600 Hz, devido ao diâmetro interior do tubo de impedância utilizado.

Com recurso ao software Matlab, foi possível proceder ao tratamento dos dados adquiridos e transpor os dados resultantes em formato vetorial fornecidos pelo tubo de impedância, elaborando os respetivos gráficos presentes nesta secção.

Como referido anteriormente, foram feitos 3 ensaios para cada um dos topos das várias composições de amostras em estudo, sendo que o gráfico que se segue ilustra as respetivas curvas de absorção efetuadas na campanha laboratorial. Para uma melhor compreensão gráfica e para eliminar os erros laboratoriais verificados devido às imperfeições que o porta-amostras possuía, optou-se por elaborar os gráficos tendo em conta a respetiva média dos três ensaios para cada um dos topos, começando apenas a nossa análise a partir dos 200 Hz, em banda de 1/3 de oitava.

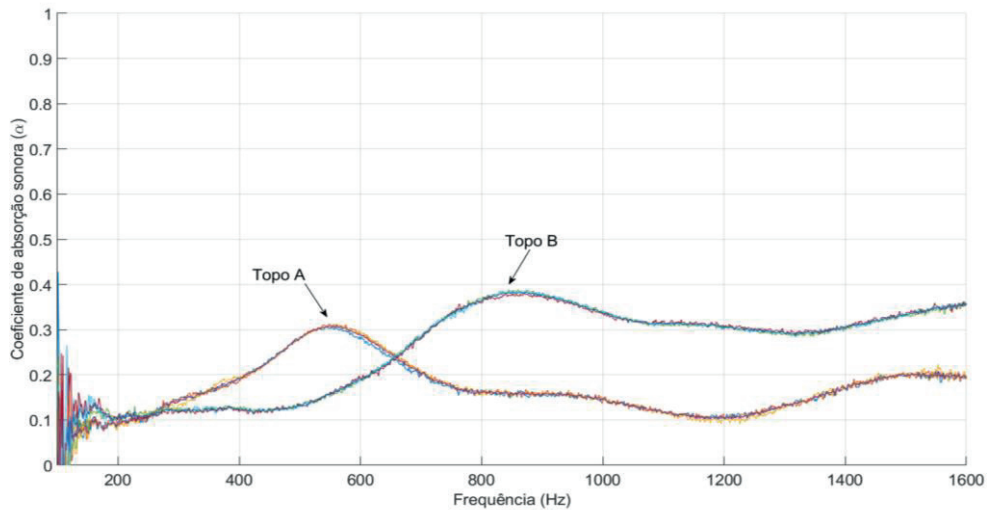


Figura 4.3 - Gráfico original de absorção sonora para a amostra R000A100_1:6 com curvas dos 3 ensaios para cada topo.

Da Figura 4.4 à Figura 4.31, separadas para cada composição de amostra, será possível observar ambas as curvas de absorção sonora média em banda de 1/3 de oitava, para cada um dos topos. Começou-se pela amostra de R000A100, aumentado progressivamente a percentagem de resíduo.

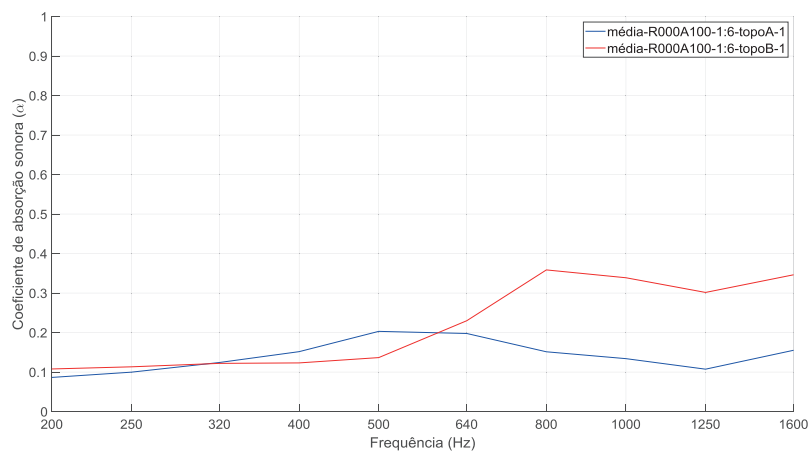


Figura 4.4 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R000A100_1:6_1.

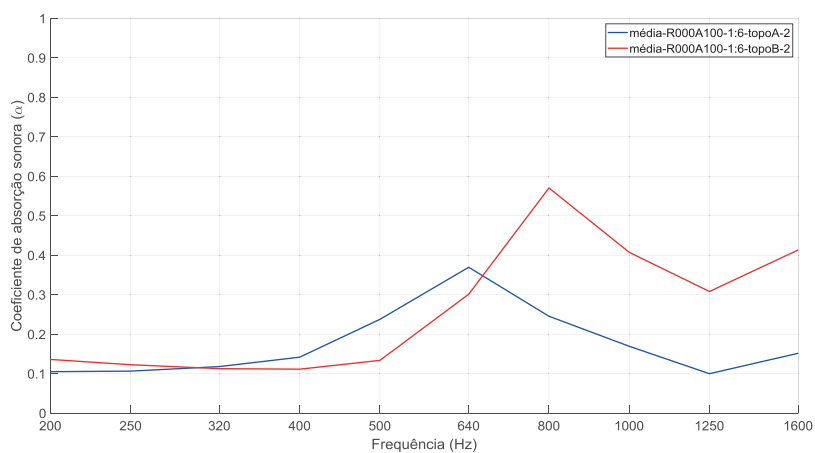


Figura 4.5 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R000A100_1:6_2.

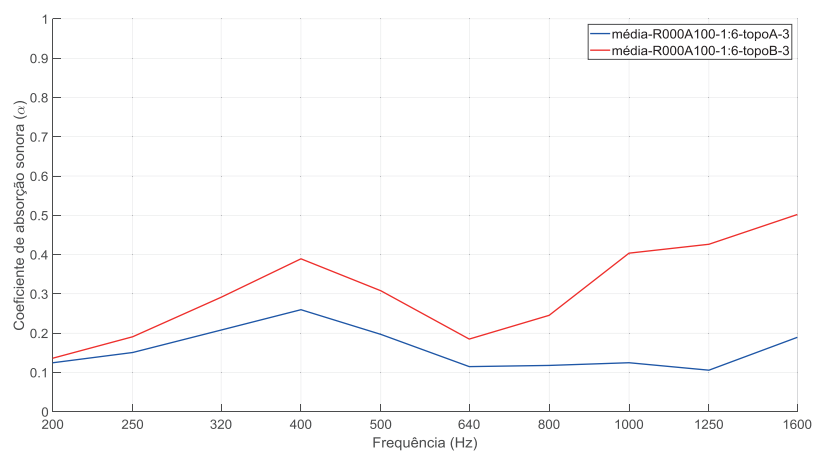


Figura 4.6 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R000A100_1:6_3.

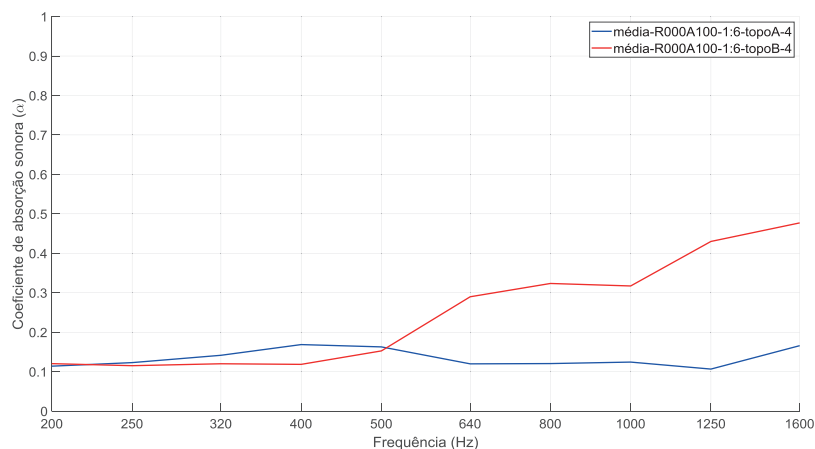


Figura 4.7 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R000A100_1:6_4.

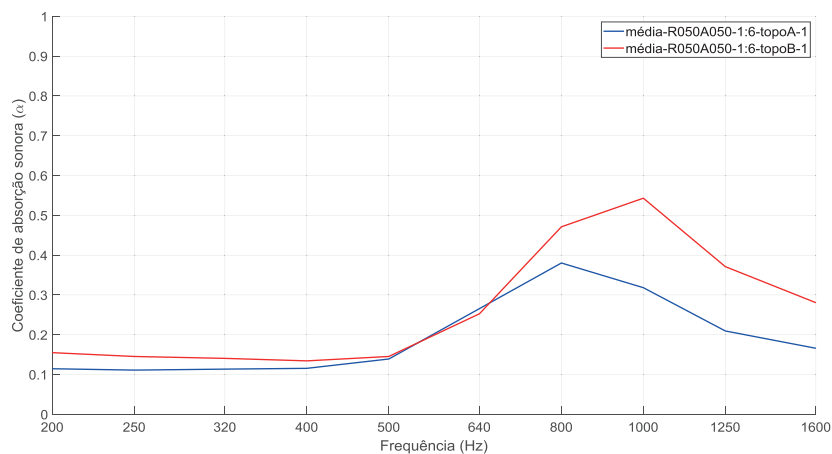


Figura 4.8 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R050A050_1:6_1.

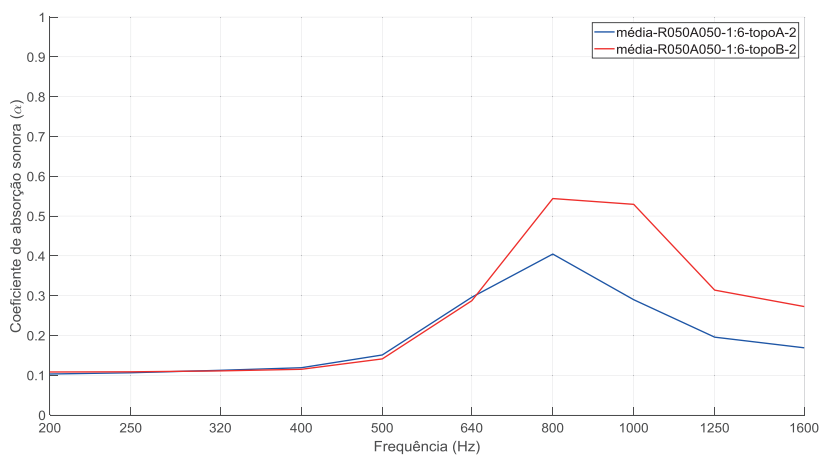


Figura 4.9 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R050A050_1:6_2.

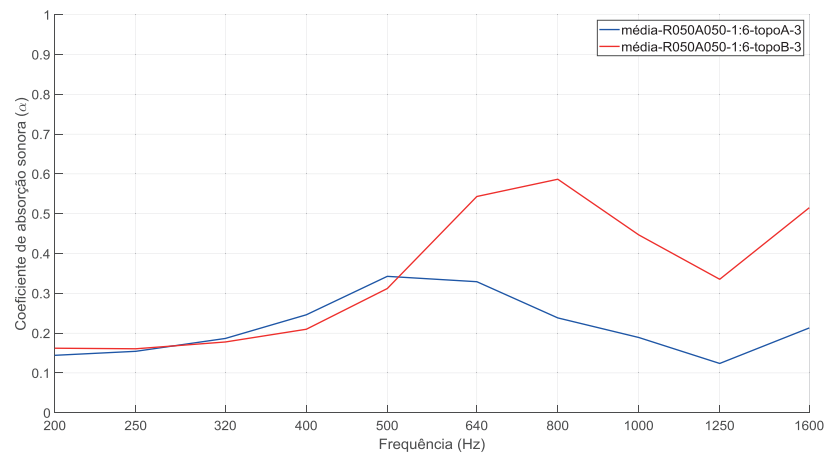


Figura 4.10 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R050A050_1:6_3.

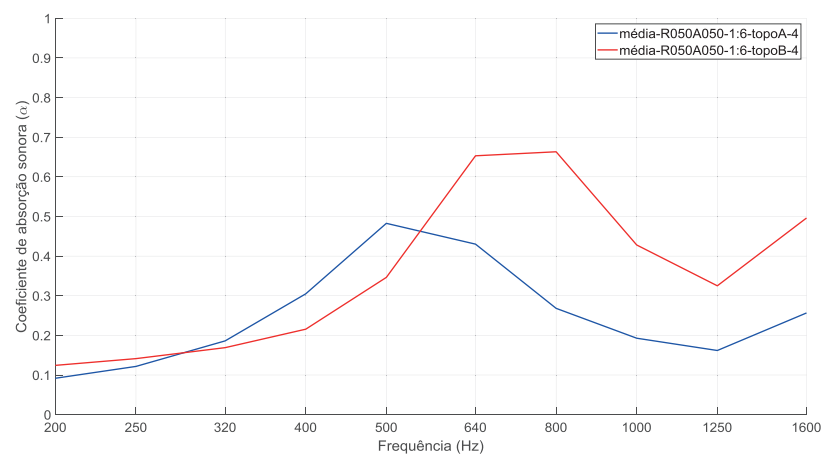


Figura 4.11 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R050A050_1:6_4.

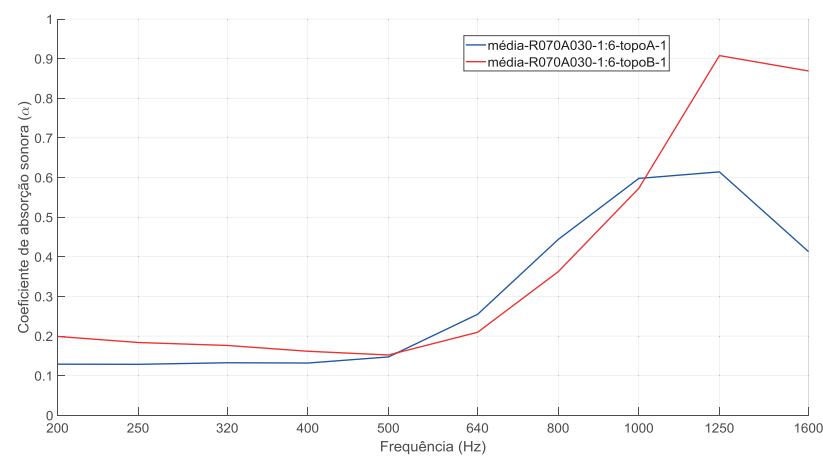


Figura 4.12 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R070A030_1:6_1.

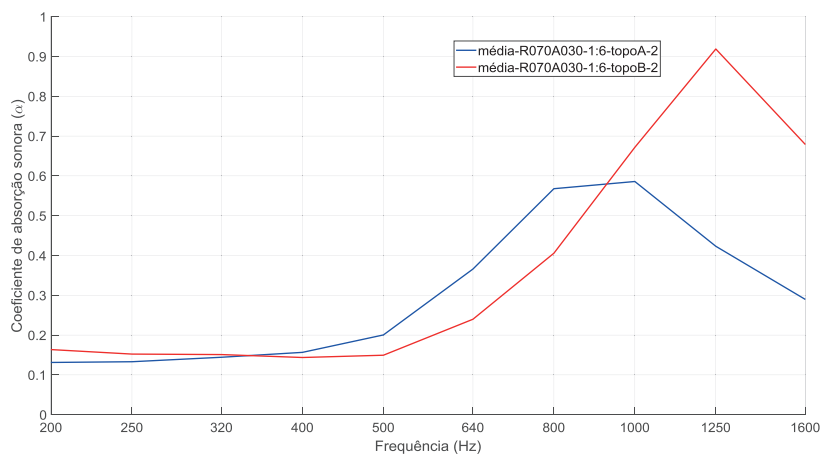


Figura 4.13 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R070A030_1:6_2.

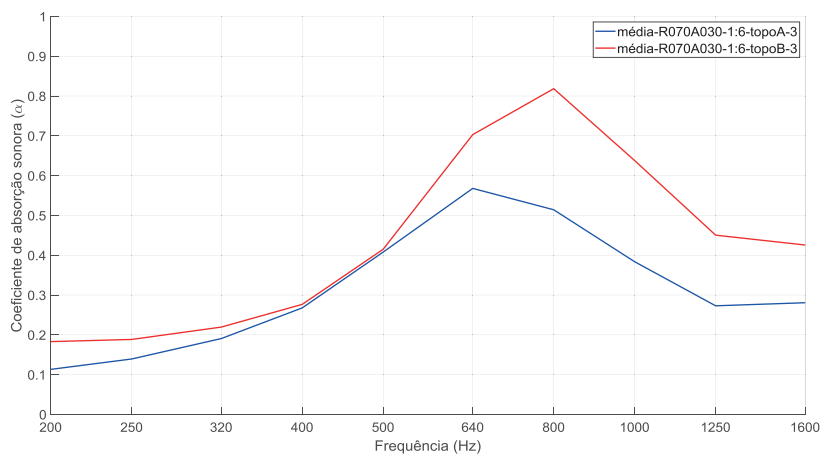


Figura 4.14 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R070A030_1:6_3.

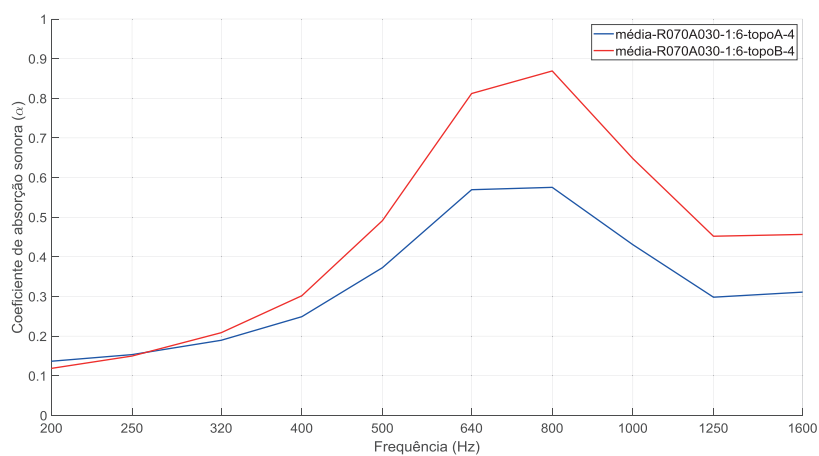


Figura 4.15 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R070A030_1:6_4.

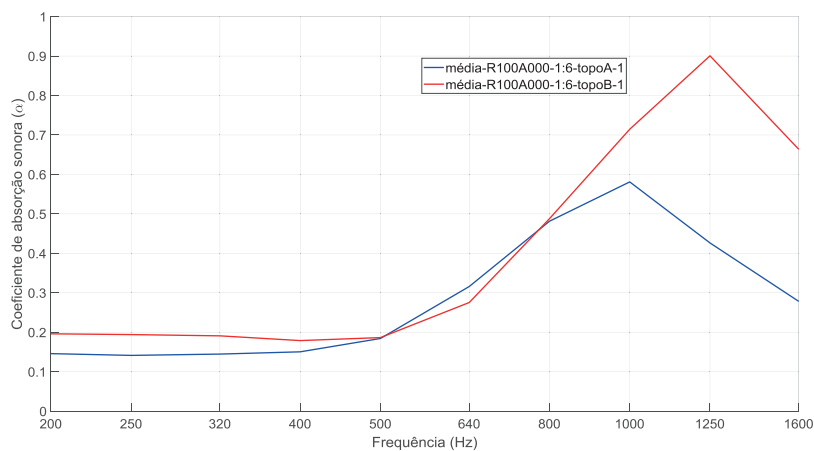


Figura 4.16 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R100A000_1:6_1.

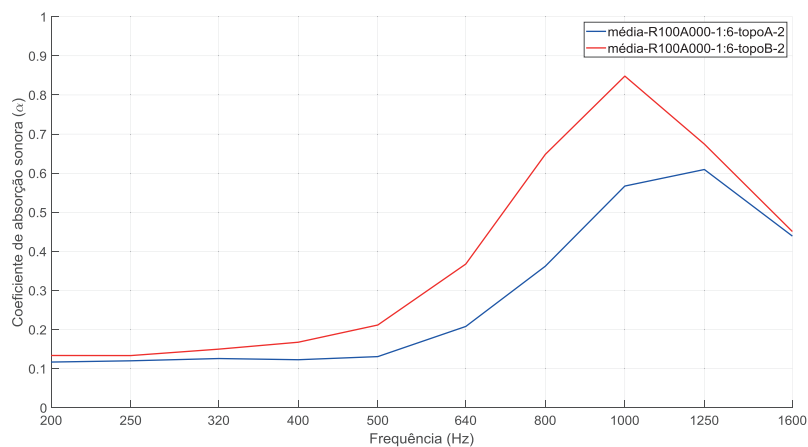


Figura 4.17 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R100A000_1:6_2.

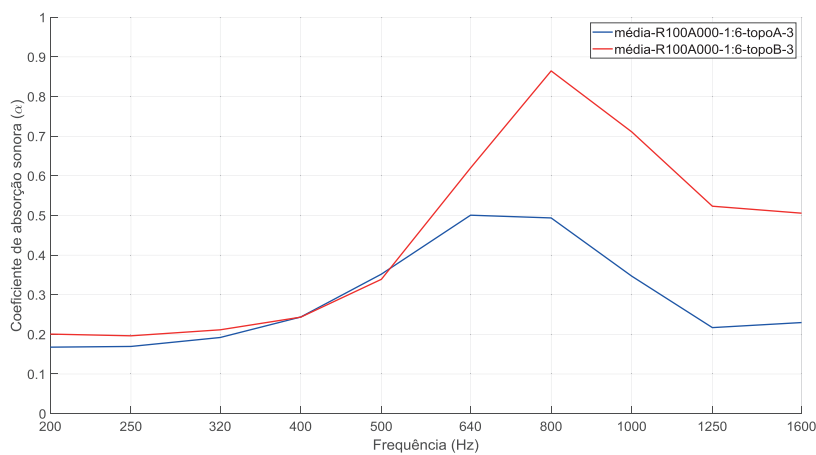


Figura 4.18 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R100A000_1:6_3.

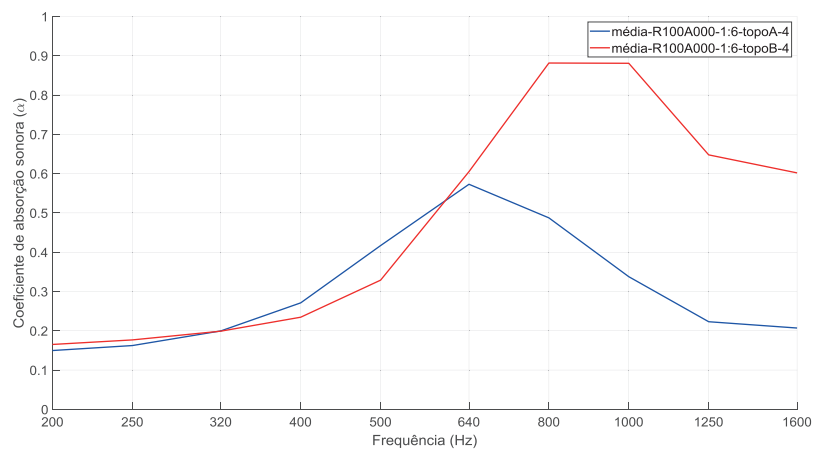


Figura 4.19 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R100A000_1:6_4.

Da Figura 4.4 à Figura 4.19, ilustram-se os resultados das amostras com o traço em peso de 1:6, sendo possível verificar que a amplitude do pico do coeficiente de absorção sonora é mais elevado à medida que a percentagem de resíduo aumenta, tendo todos eles o seu pico, sensivelmente, na mesma gama do espectro de frequência entre os 640 Hz e os 1600 Hz.

Analisando as curvas de absorção sonora para cada topo de cada amostra, é visível que o coeficiente de absorção é idêntico para as baixas frequências, salientando-se que para a gama das frequências médias e altas a curva do topo B, possui sempre um coeficiente superior ao topo A. Para as amostras com uma percentagem de resíduo superior a 50%, é visível a existência de um pico de ressonância, em geral, bem definido. Esse mesmo pico, têm a tendência de se deslocar para frequências mais elevadas com a diminuição da espessura dos provetes. Contudo, independentemente da espessura do provete, o coeficiente de absorção sonora é idêntico para ambas as espessuras. Este tipo de amostras, possuem resultados bastante satisfatórios quando comparados com os provetes de percentagem de resíduo inferior, tendo um coeficiente de absorção sonora no intervalo de 0,82 e os 0,92.

Seguidamente, apresentam-se os gráficos referentes às amostras de traço em peso 1:4 (Figura 4.20 a Figura 4.31).

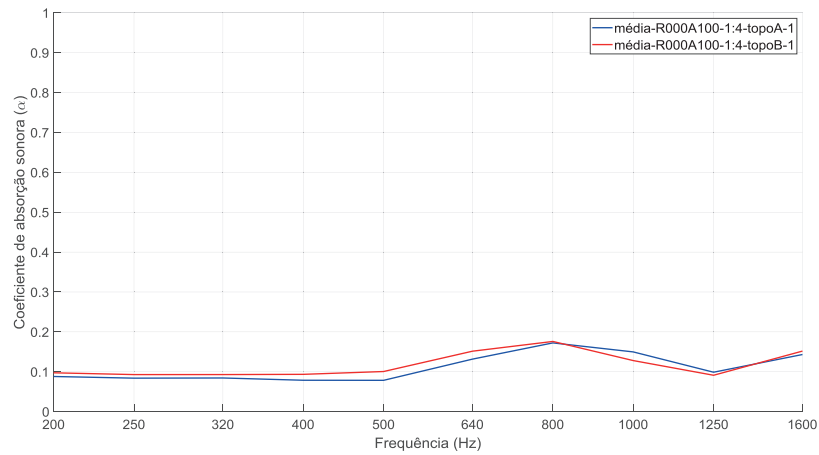


Figura 4.20 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R000A100_1:4_1.

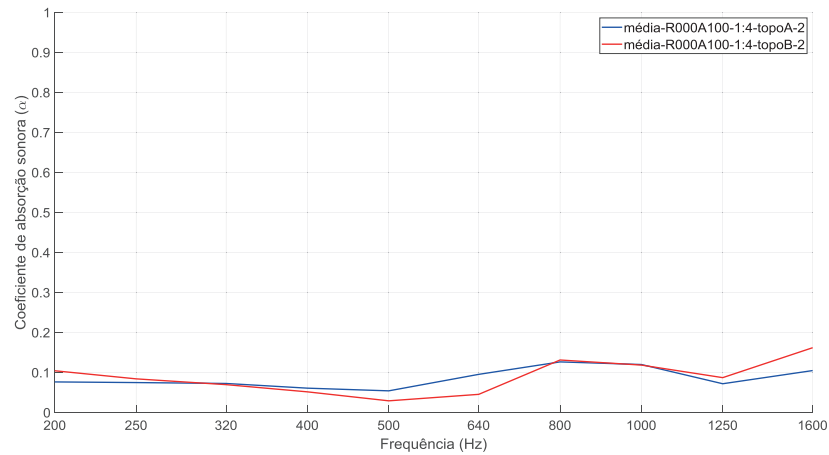


Figura 4.21 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R000A100_1:4_2.

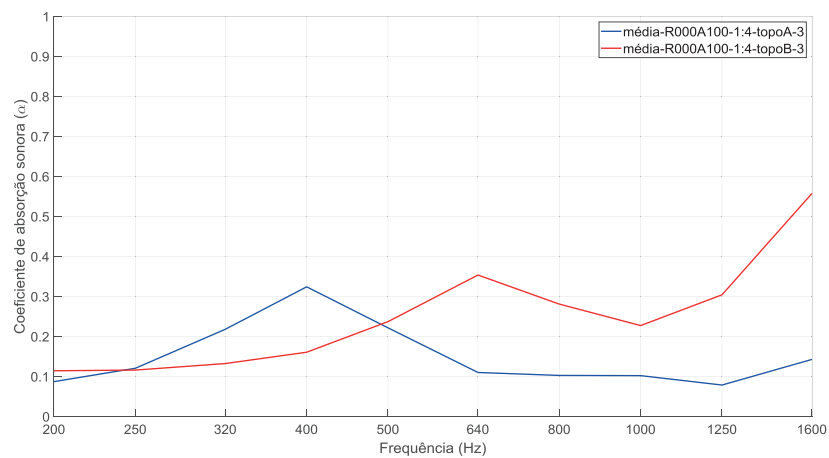


Figura 4.22 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R000A100_1:4_3.

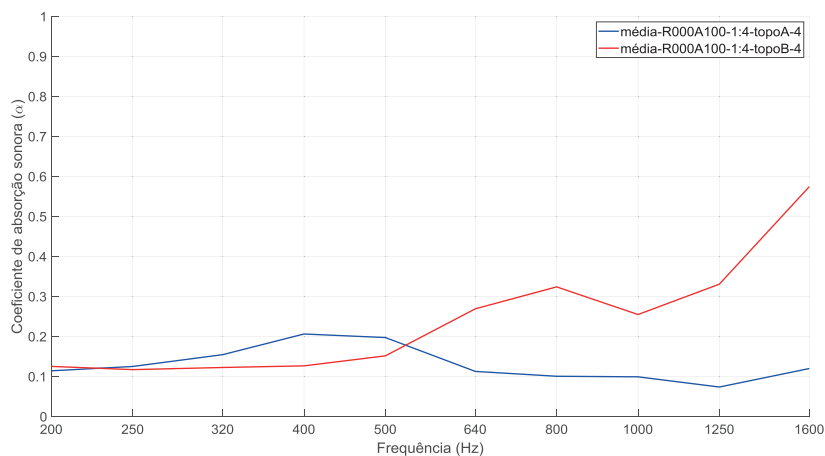


Figura 4.23 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R000A100_1:4_4.

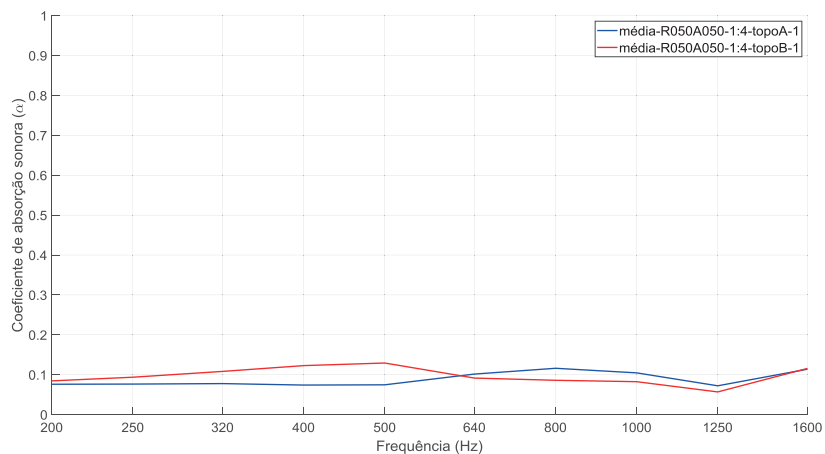


Figura 4.24 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R050A050_1:4_1.

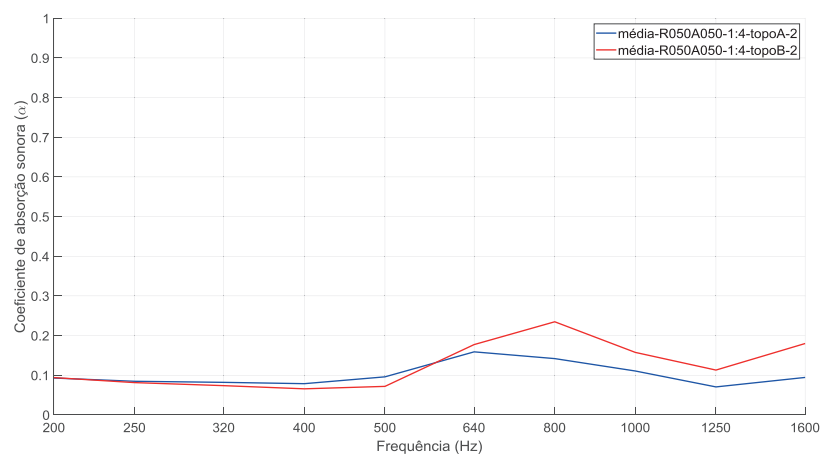


Figura 4.25 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R050A050_1:4_2.

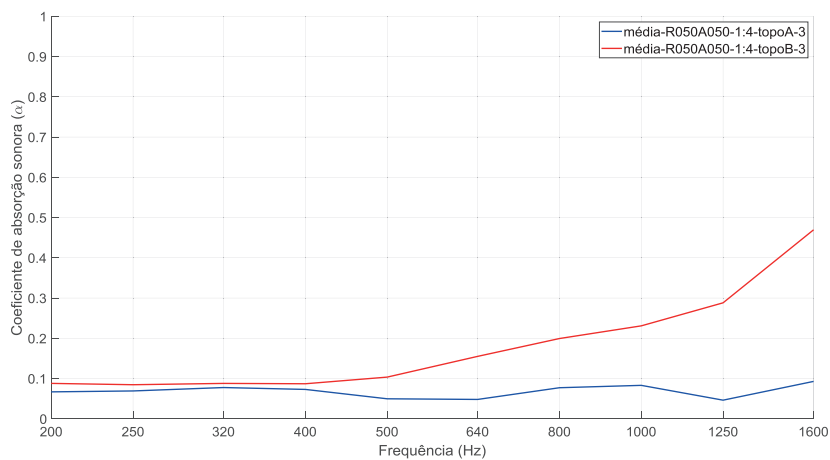


Figura 4.26 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R050A050_1:4_3.

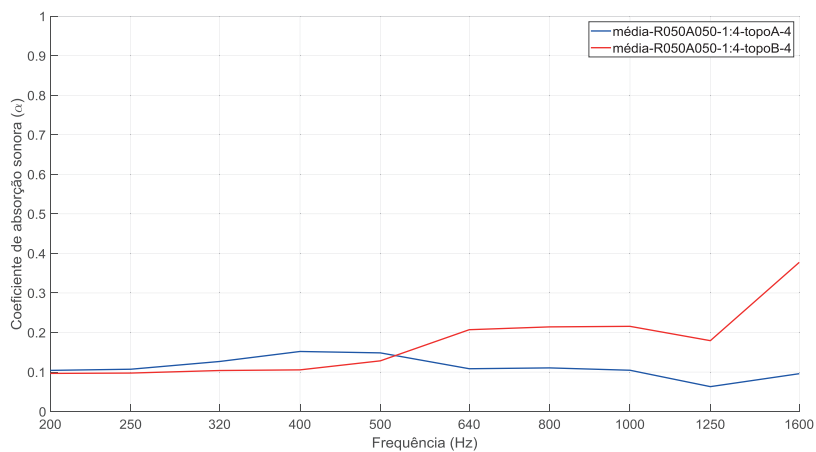


Figura 4.27 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R050A050_1:4_4.

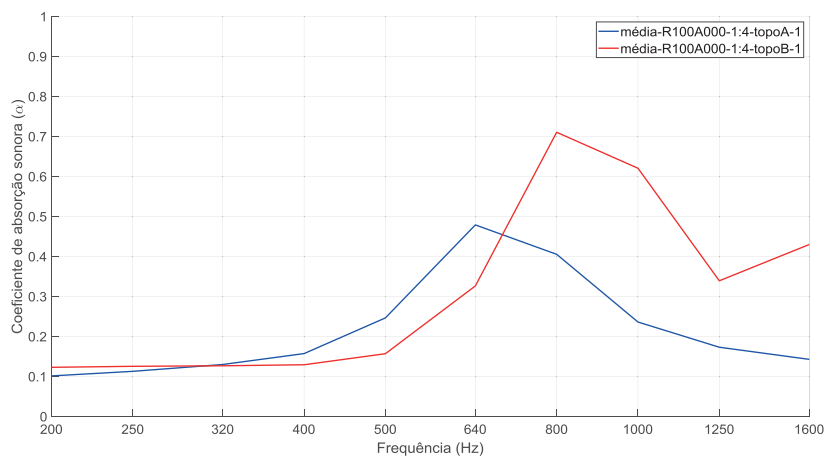


Figura 4.28 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R100A000_1:4_1.

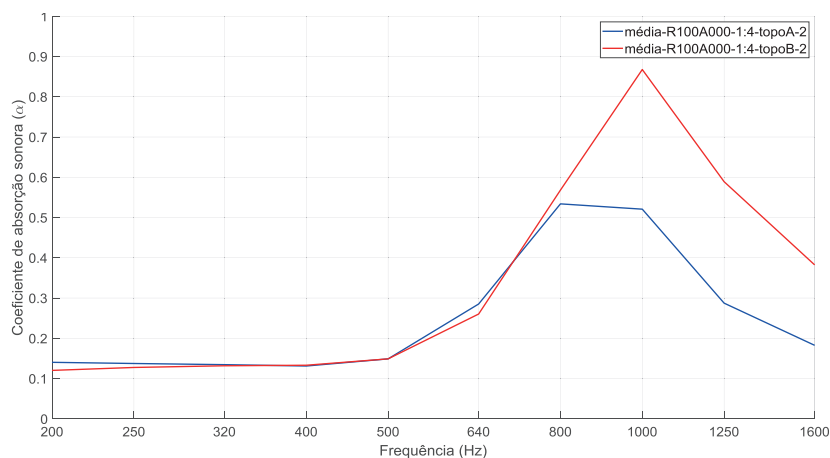


Figura 4.29 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R100A000_1:4_2.

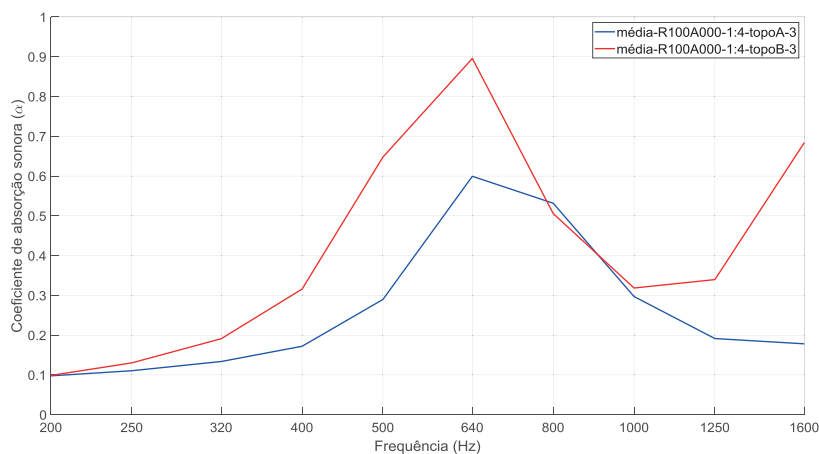


Figura 4.30 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R100A000_1:4_3.

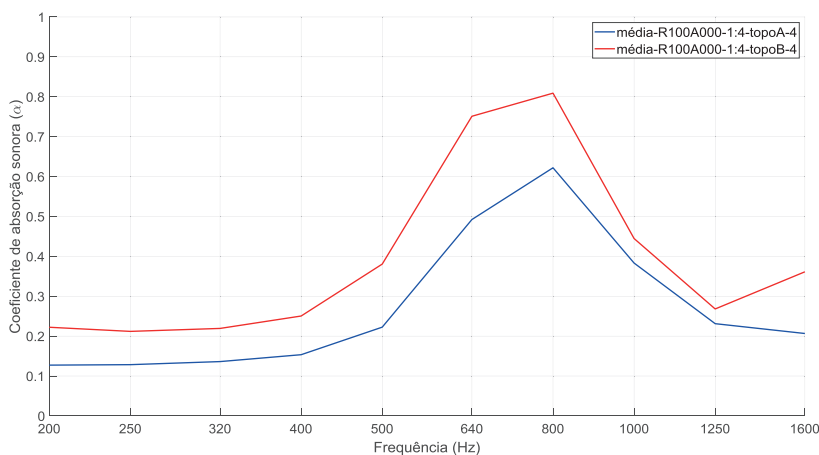


Figura 4.31 - Gráfico de absorção sonora em banda de 1/3 de oitava para a amostra R100A000_1:4_4.

Os gráficos das amostras de traço em peso 1:4 vieram confirmar as conclusões preliminares que foram retiradas aquando da análise da porosidade, o que não é de todo de estranhar pois, como já antes foi dito, este parâmetro se relaciona diretamente com o seu desempenho acústico. Da mesma forma que na análise anterior, o aumento da percentagem de resíduo fez com que o produto possuísse um coeficiente de absorção sonora superior. Neste caso, e uma vez que as amostras deste tipo de composição têm uma formação muito particular, contendo uma quantidade muito grande de ligante hidráulico e água que fazem com que parte do provete esteja completamente preenchido, verificando-se mais nos provetes de espessuras menores (_1 e _2). É então natural que os provetes de menores dimensões quando comparados com os da mesma composição tenham um coeficiente de absorção sonora inferior aos de espessuras maiores (_3 e _4).

Como acontece nas amostras de traço em peso 1:6, mas com uma notoriedade maior, o pico de ressonância apenas é visível nos provetes com uma composição de 100% de resíduo. Sendo que em todos os outros, o coeficiente de absorção sonora é bastante reduzido quando comparado com esta composição.

Por fim, para facilitar e complementar a análise gráfica, apresentam-se os valores do coeficiente de absorção para cada um dos valores da frequência em banda de 1/3 de oitava. Com um preenchimento a verde, estão selecionados os valores do coeficiente de absorção mais elevado para cada uma das referências de amostras.

Quadro 4.1 - Coeficientes de absorção para cada grupo de amostra com o traço 1:6, com respectivo valor máximo assinalado.

Frequência (Hz)		200	250	320	400	500	640	800	1000	1250	1600
R000A100_1:6_1	Topo A	0,09	0,10	0,12	0,15	0,20	0,20	0,15	0,13	0,11	0,16
	Topo B	0,11	0,11	0,12	0,12	0,14	0,23	0,36	0,34	0,30	0,35
R000A100_1:6_2	Topo A	0,10	0,11	0,12	0,14	0,24	0,37	0,25	0,17	0,10	0,15
	Topo B	0,14	0,12	0,11	0,11	0,13	0,30	0,57	0,41	0,31	0,41
R000A100_1:6_3	Topo A	0,12	0,15	0,21	0,26	0,20	0,12	0,12	0,13	0,11	0,19
	Topo B	0,14	0,19	0,29	0,39	0,31	0,18	0,25	0,40	0,43	0,50
R000A100_1:6_4	Topo A	0,11	0,12	0,14	0,17	0,16	0,12	0,12	0,12	0,11	0,16
	Topo B	0,12	0,12	0,12	0,12	0,15	0,29	0,32	0,32	0,43	0,48

R050A050_1:6_1	Topo A	0,12	0,11	0,11	0,12	0,14	0,27	0,38	0,32	0,21	0,17
	Topo B	0,16	0,15	0,14	0,13	0,15	0,25	0,47	0,54	0,37	0,28
R050A050_1:6_2	Topo A	0,10	0,11	0,11	0,12	0,15	0,30	0,40	0,29	0,20	0,17
	Topo B	0,11	0,11	0,11	0,12	0,14	0,29	0,54	0,53	0,31	0,27
R050A050_1:6_3	Topo A	0,14	0,15	0,19	0,25	0,34	0,33	0,24	0,19	0,12	0,21
	Topo B	0,16	0,16	0,18	0,21	0,31	0,54	0,57	0,45	0,34	0,52
R050A050_1:6_4	Topo A	0,09	0,12	0,19	0,30	0,48	0,43	0,27	0,19	0,16	0,26
	Topo B	0,12	0,14	0,17	0,22	0,35	0,65	0,60	0,43	0,33	0,50

R070A030_1:6_1	Topo A	0,13	0,13	0,13	0,13	0,15	0,26	0,44	0,60	0,61	0,41
	Topo B	0,20	0,18	0,18	0,16	0,15	0,21	0,36	0,57	0,90	0,87
R070A030_1:6_2	Topo A	0,13	0,13	0,14	0,16	0,20	0,37	0,57	0,59	0,42	0,29
	Topo B	0,16	0,15	0,15	0,14	0,15	0,24	0,41	0,67	0,92	0,68
R070A030_1:6_3	Topo A	0,11	0,14	0,19	0,27	0,41	0,57	0,51	0,38	0,27	0,28
	Topo B	0,18	0,19	0,22	0,28	0,42	0,70	0,82	0,64	0,45	0,43
R070A030_1:6_4	Topo A	0,14	0,15	0,19	0,25	0,37	0,57	0,58	0,43	0,30	0,31
	Topo B	0,12	0,15	0,21	0,30	0,49	0,81	0,87	0,65	0,45	0,46

R100A000_1:6_1	Topo A	0,15	0,14	0,15	0,15	0,18	0,32	0,48	0,58	0,43	0,28
	Topo B	0,19	0,19	0,19	0,18	0,19	0,28	0,49	0,71	0,90	0,66
R100A000_1:6_2	Topo A	0,12	0,12	0,13	0,12	0,13	0,21	0,36	0,57	0,61	0,44
	Topo B	0,13	0,13	0,15	0,17	0,21	0,37	0,65	0,85	0,67	0,45
R100A000_1:6_3	Topo A	0,17	0,17	0,19	0,24	0,35	0,50	0,49	0,35	0,22	0,23
	Topo B	0,20	0,20	0,21	0,24	0,34	0,62	0,87	0,71	0,52	0,51
R100A000_1:6_4	Topo A	0,15	0,16	0,20	0,27	0,42	0,57	0,49	0,34	0,22	0,21
	Topo B	0,17	0,18	0,20	0,24	0,33	0,61	0,88	0,88	0,65	0,60

Quadro 4.2 - Coeficientes de absorção para cada grupo de amostra com traço 1:4, com respetivo valor máximo assinalado.

Frequência (Hz)		200	250	320	400	500	640	800	1000	1250	1600
R000A100_1:4_1	Topo A	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,13	0,17	0,15	0,10	0,14
	Topo B	0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	0,15	0,18	0,13	0,09	0,15
R000A100_1:4_2	Topo A	0,08	0,08	0,07	0,06	0,05	0,10	0,13	0,12	0,07	0,10
	Topo B	0,10	0,08	0,07	0,05	0,03	0,05	0,13	0,12	0,09	0,16
R000A100_1:4_3	Topo A	0,09	0,12	0,22	0,32	0,22	0,11	0,10	0,10	0,08	0,14
	Topo B	0,11	0,12	0,13	0,16	0,24	0,35	0,28	0,23	0,30	0,56
R000A100_1:4_4	Topo A	0,11	0,13	0,15	0,21	0,20	0,11	0,10	0,10	0,07	0,12
	Topo B	0,13	0,12	0,12	0,13	0,15	0,27	0,32	0,25	0,33	0,57

R050A050_1:4_1	Topo A	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08	0,10	0,12	0,10	0,07	0,11
	Topo B	0,09	0,09	0,11	0,12	0,13	0,09	0,09	0,08	0,06	0,12
R050A050_1:4_2	Topo A	0,09	0,09	0,08	0,08	0,10	0,16	0,14	0,11	0,07	0,09
	Topo B	0,09	0,08	0,07	0,07	0,07	0,18	0,24	0,16	0,11	0,18
R050A050_1:4_3	Topo A	0,07	0,07	0,08	0,07	0,05	0,05	0,08	0,08	0,05	0,09
	Topo B	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,16	0,20	0,23	0,29	0,47
R050A050_1:4_4	Topo A	0,10	0,11	0,13	0,15	0,15	0,11	0,11	0,10	0,06	0,10
	Topo B	0,10	0,10	0,10	0,11	0,13	0,21	0,21	0,22	0,18	0,38

R100A000_1:4_1	Topo A	0,10	0,11	0,13	0,16	0,25	0,48	0,41	0,24	0,17	0,14
	Topo B	0,12	0,13	0,13	0,13	0,16	0,33	0,71	0,62	0,34	0,43
R100A000_1:4_2	Topo A	0,14	0,14	0,13	0,13	0,15	0,29	0,53	0,52	0,29	0,18
	Topo B	0,12	0,13	0,13	0,13	0,15	0,26	0,57	0,87	0,59	0,38
R100A000_1:4_3	Topo A	0,10	0,11	0,13	0,17	0,29	0,60	0,53	0,30	0,19	0,18
	Topo B	0,10	0,13	0,19	0,32	0,65	0,90	0,51	0,32	0,34	0,68
R100A000_1:4_4	Topo A	0,13	0,13	0,14	0,15	0,22	0,49	0,62	0,38	0,23	0,21
	Topo B	0,22	0,21	0,22	0,25	0,38	0,75	0,81	0,45	0,27	0,36

4.5. Discussão de Resultados

A partir dos resultados obtidos é possível concluir que, de uma forma geral, todas as amostras apresentam alguma relevância do ponto de vista da absorção sonora.

Da análise das curvas gráficas resulta que este tipo de solução acústica exibe valores mais elevados de absorção sonora na gama das médias e altas frequências (superiores a 500 Hz e 640 Hz), o que se observa em todas as amostras produzidas. Para além disso, é possível verificar que o pico do coeficiente de absorção apenas se dá para um espectro muito pequeno de

frequências com uma ressonância bem notória, sendo a curva bastante acentuada antes e após esse pico, o que significa que a solução se torna específica para a atenuação sonora num espectro de frequências muito reduzido. A análise apenas foi feita na gama dos 100 Hz aos 1600 Hz, não podendo ser conclusiva para frequências superiores em virtude do tubo de impedância utilizado.

Como seria de esperar, face ao que foi dito anteriormente, o topo B possui sempre uma atenuação sonora superior à verificada no topo A da mesma amostra. Tal deve-se ao facto desse topo, quando comparado com o A, compactado manualmente com um pilão, possuir um número muito superior de cavidades porosas. Deste modo, é possível que haja uma aproximação da impedância do material com a do meio, fazendo com que exista uma melhor dissipação em calor da energia cinética da propagação das ondas sonoras, assim permitindo verificar absorção sonora.

Do ponto de vista da constituição da amostra, de forma geral, quanto maior for a percentagem de resíduo, maior é a atenuação sonora que o material consegue promover. Com uma granulometria mais elevada do que a da argila expandida 0-2, o resíduo confere à amostra uma granulometria superior e, por sua vez, um índice de vazios maior.

No que toca à espessura da amostra, é notório que amostras com a mesma espessura podem não ter o mesmo coeficiente de absorção sonora. Como analisado anteriormente, as amostras da mesma referência e espessura possuem características físicas algo diferentes, logo, não se comportam exatamente da mesma forma, apesar de não haver uma grande discrepância entre os valores de α . No traço em peso 1:4, esta discrepância é mais acentuada.

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A elevada preocupação com as questões ambientais que têm abalado o mundo atual, torna imprescindível que a sociedade tome medidas capazes de prevenir e reverter o elevado consumo de recursos, principalmente os não renováveis, que são aqueles que num futuro próximo se esgotarão. Ao mesmo tempo, e não menos importante, a produção excessiva de resíduos, que vão para vazadouros e que não são utilizados, também provoca um elevado problema ambiental. O setor da construção é um dos principais consumidores de recursos não renováveis e produtor de resíduos, nomeadamente, os RCD.

Estas premissas, levou a aceitar o desafio de procurar novas soluções construtivas capazes de incorporar resíduos. Neste caso, os resíduos, dispensados pela empresa ValorSul, S.A., são uma mistura constituída essencialmente por escórias da queima dos resíduos sólidos urbanos e de RCD da zona onde esta atua.

Na revisão bibliográfica efetuada, chegamos à conclusão que existem várias soluções de atenuação sonora para aplicação em exteriores, algumas das quais com recurso à incorporação de resíduos. Verifica-se, no entanto, que estas soluções têm ainda uma margem de progressão muito grande no que toca à sua composição.

Após o estudo das matérias-primas que utilizamos na produção do nosso produto, elaborámos provetes com várias percentagens de resíduo (0%, 30%, 50%, 70% e 100%) e com espessuras variadas (4 cm, 6 cm e 8 cm), para se efetuar a campanha de ensaios necessária para a sua caracterização física e mecânica.

Relativamente à massa volúmica aparente, esta aumenta consoante o aumento da percentagem de resíduo nas amostras, mantendo-se sensivelmente constante nas diversas espessuras da mesma composição. Quanto à porosidade, as amostras apresentam valores idênticos para as mesmas composições, não variando com a espessura. De notar que as amostras de traço em peso 1:4 possuem valores mais reduzidos em comparação com o traço em peso 1:6.

Os ensaios à compressão e à flexão, demonstraram que possui uns valores de resistência à compressão mais elevados do que à flexão, com o valor da tensão de rotura à compressão a diminuir com a presença de maior quantidade de resíduo para o traço em peso 1:6. Verificando-se valores mais elevados, e na ordem inversa, no traço em peso 1:4.

Pela campanha de estudos acústicos que foram realizados, no decorrer deste trabalho, é possível concluir que existem amostras com uma atenuação sonora bastante elevada na gama de frequências entre os 100 Hz e os 1600 Hz. As amostras com o traço em peso de 1:6, com uma quantidade superior de resíduo (>70%), são capazes de conferir uma atenuação sonora bastante relevante com um coeficiente de atenuação sonora entre 0,82 e 0,92 na gama dos 800 Hz e 1250 Hz. As amostras com o traço de 1:4, uma vez que na sua composição têm uma quantidade muito elevada de ligante hidráulico e, conseqüentemente, menos resíduo, possuem melhores resultados mecânicos do que acústicos, em termos de absorção sonora.

A amostra R070A030_1:6 é aquela que, no conjunto acústico-físico-mecânico, apresenta maiores benefícios.

No decorrer da investigação, foram identificadas algumas lacunas, assumidas na aquisição dos resultados, das quais se salientam: a não homogeneização do resíduo proveniente da ValorSul, a circunstância de, para o mesmo tipo de composição, terem que ser feitas por duas amassaduras e a compactação das amostras não ser uniforme e nem mecânica.

Mesmo tendo cumprido os objetivos a que este estudo se propunha, o mesmo poderá ser melhorado com a validação dos seus resultados com modelos teóricos de absorção sonora, nomeadamente o modelo Horoshenkov and Swift. A produção de amostras com uma quantidade superior de resíduo e o estudo de uma gama mais alargada de amostras permitiria também acrescentar valor ao estudo, tornando possível analisar o desempenho acústico do produto com dimensões superiores e para uma gama mais alargada de frequências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andersen, B, Larsen L E, Bendtsen, H, (2005) - Acoustic Performance of Low-Noise Road Pavements - Silvia Project Report.

António J., Tadeu A., Marques B., Almeida J.A.S., Pinto V. (2018) - “Application of rice husk in the development of new composite boards”. *Construction and Building Materials*, Vol. 176, pp.432-439.

Arenas, J. P., & Crocker, M. J. (2010). Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound & Vibrations* , pp.12-17.

Bies, D. A., Hansen, C. H. (2003), “Engineering Noise Control: Theory and Practice”, 3ª Edição, Spon Press.

ValorSul, S.A. @ (2019) - “Agregado 0/31,5 – Uma alternativa sustentável”, retirado de: www.valorsul.pt/pt/seccao/areas-de-negocio/produtos/agregado-para-construcao-rodoviaria. Brochura técnica. Consultado em 25/07/2019.

Canha da Piedade, A. (2000). Construir no presente, conservando o futuro. Lisboa: Ingenium II séries.

Castilhos, L.F.F. (2011). “Aproveitamento da fibra de coco”, Dossiê técnico, Instituto de Tecnologia do Paraná, Agosto.

Davis, M. J. M.; Tenpierik, M. J.; Ramiréz, F. R.; Pérez, M. E.,(2017) - More than just a Green Façade: The sound absorption properties of a vertical garden with and without plants. *Building and Environment*, Vol. 116, pp. 64-72.

Decreto-Lei nº 73/2011 de 7 de junho. In *Diário da República*, I Série, nº 116, 17 de junho de 2011, Lisboa.

Decreto-Lei nº 9/2007 de 17 de janeiro. “Regulamento Geral do Ruído (RGR)”. In *Diário da República*, I Série, nº 12, 17 de janeiro de 2007, Lisboa.

Decreto-Lei nº 96/2008 de 9 de junho. “Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE)”. In Diário da República, I Série, nº 110, 9 de junho de 2008, Lisboa.

Delany, M. E.; Bazley, E. N., (1970) - Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*, v. 3, pp. 105-116.

EN 1015-2 (1998). Methods of test for mortar for masonry: Part 2-Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars Brussels: European committee for standardization, 1998.

EN 1015-6 (1998). Methods of test for mortar for masonry: Part 6-Determination of bulk density of fresh mortar. Brussels: European committee for standardization, 1998.

EN ISO 10534-2 (1998). “Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transfer-function method”. International Organization for Standardization.

Fahy, Frank. *Foundations of engineering acoustics*. London: Academic Press, 2003. p.435.

Fernandes, F. (2018, 16 de janeiro). Barreiras acústicas de borracha mais flexíveis. *Jornal de Notícias*. Acedido a 20 de maio de 2019, em: <https://www.jornaldenegocios.pt/negocios-iniciativas/detalhe/barreiras-acusticas-de-borracha-mais-eficazes>.

Freitas, E., Pereira, P., de Picado-Santos, L., & Santos, A. (2009). Traffic noise changes due to water on porous and dense asphalt surfaces. *Road Materials and Pavement Design*.

Geiger, O. @ (2013). Thermo Hemp Insulation. [Em linha]. Disponível em <http://www.naturalbuildingblog.com/thermo-hemp-insulation/>. [Consultado em 14/04/2019].

Hwang, C.L., Tran, V.A., Hong, J.W., Hsiesh, Y.C. (2016). “Effects of short coconut fiber on the mechanical properties, plastic cracking behavior, and impact resistance of cementitious composites”, *Construction and Building Materials*, Vol.127, Pages 984-992.

Kymalainen, H. e Sjoberg, A. (2008). “Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations”. *Building and Environment*, Vol. 43, p. 1261-1269 (2008).

Mareze, P. H. (2013). “Análise da influência da microgeometria na absorção sonora de materiais porosos de estrutura rígida”. Tese de doutoramento, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

- Nilsson R., Nordlander J-O., Sliwa N. and Contributors, (2005) Design Guidelines for Durable, Noise Reducing Pavement. Silvia Project Deliverable, SILVIA SKANSKA-018-01WP4-231105.
- NP EN 12390-3 (2009). Ensaios de betão endurecido: Parte 3-Resistência à compressão de provetes. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 12390-5 (2009). Ensaios de betão endurecido: Parte 5-Resistência à flexão de provetes. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 196-1 (2006). Métodos de ensaio de cimentos: Parte 1-Determinação das resistências mecânicas. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 196-2 (2006). Métodos de ensaio de cimentos: Parte 2-Análise química dos cimentos. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 196-21 (1990). Métodos de ensaios de cimentos: Parte 21-Determinação do teor em claretos, dióxido de carbono e álcalis nos cimentos. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 196-3 (1990). Métodos de ensaio de cimentos: Parte 3-Determinação do tempo de presa e da expansibilidade. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 197-1 (2012). Cimento: Parte 1- Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 933-1 (2014). Ensaios das propriedades geométricas dos agregados: Parte 1-Análise granulométrica. Método de peneiração. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- Oliveira de Carvalho, A. P., (2008). Acústica ambiental e de edifícios. Edições FEUP, Porto.
- Patrício, J. (2008). “Acústica nos Edifícios”. Verlag Dashofer. Lisboa.
- Ribeiro, J. (2018). “Contribuição para o estudo de materiais e soluções de absorção sonora”. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Silva, E., Marques, M., Junior, C.F. (2012). “Aplicação da Fibra de Coco em Matrizes Cimentícias”, Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, ISSN: 2236-1170, Vol. 8, pp. 1555-1561, Bahia, Brasil.
-

Tadeu, A.; Mateus, D.; Antonio, J.; Godinho, L.; Mendes, P. A. (2010). “Acústica Aplicada”, textos de apoio à disciplina de Acústica Aplicada, DEC, FCTUC, Coimbra.

Valadas, B., & Leite, M. J. (2004). O Ruído e a Cidade. Instituto do Ambiente.

Vigran, E. (2008). “Building acoustics”, Taylor & Francis Ltd.

Watson, D. (2006), “Evaluation of Benefits and opportunities for innovative noise barrier designs”, Relatório Final 572, Cooperação entre o Departamento de Transportes de Arizona e o FHWA, Arizona.

Watts, G. (2002), “Barriers designed to reduce road traffic noise”, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport 153, Paper 12680, Issue 2, pp. 79-86.