



Anabela Mendes Moreira

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS E ACÚSTICAS DE BETONILHAS COM INCORPORAÇÃO DE CORTIÇA

Dissertação de Doutoramento na área científica de Engenharia Civil, na especialidade de Construções, orientada pelo Professor Doutor António José Barreto Tadeu e pela Professora Doutora Julieta Maria Pires António e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
2013



UNIVERSIDADE DE COIMBRA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
Departamento de Engenharia Civil

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS E
ACÚSTICAS DE BETONILHAS COM INCORPORAÇÃO DE
CORTIÇA**

Anabela Mendes Moreira

Julho, 2013

Tese de Doutoramento na área Científica de Engenharia Civil, na especialidade de Construções, apresentada ao
Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

À minha Mãe

e

À memória do meu Pai

Agradecimentos

Este trabalho é enquadrado na Iniciativa Energia para a Sustentabilidade da Universidade de Coimbra e apoiado pelo projeto Energy and Mobility for Sustainable Regions - EMSURE (CENTRO-07-0224-FEDER-002004).

Ainda que a elaboração de uma tese seja, pela sua finalidade académica, um trabalho individual, há contributos, de natureza diversa, essenciais para o seu desenvolvimento.

Aos meus orientadores científicos Professor Doutor António Tadeu e Professora Doutora Julieta António a quem devo os primeiros e fundamentais agradecimentos: ao Professor Doutor António Tadeu por me ter facultado todas as condições para o desenvolvimento deste trabalho, particularmente no ITeCons a que preside, pela generosidade na partilha da sua visão superior sobre a Ciência, pelo rigor científico, pela disponibilidade de esclarecer as minhas dúvidas e pela paciência; À Professora Doutora Julieta António, verdadeiro exemplo de dedicação, pelos preciosos ensinamentos, pelo rigor científico, pela permanente disponibilidade e paciência e pelas afáveis palavras de incentivo.

Endereço, ainda, os meus agradecimentos:

Ao ITeCons onde encontrei excelentes instalações laboratoriais e pessoas de elevadas competências técnicas e humanas. Gostaria de agradecer particularmente ao Igor Castro e ao Saúl Martins, à Inês Simões, à Ana Isabel, ao Ricardo Marques, à Andreia Gil, à Ana Nossa, à Gina Matias, ao António e ao José Nascimento, ao Luís Pereira, à Sofia, ao Edney, ao Nuno Tinoco, ao Luís e à D. São. Não esqueço a cordialidade dos colegas Nuno Simões, Paulo Mendes e Luís Godinho, da Rita, da Ângela, do José Abrantes e do Jorge. Ao Nuno Biga pela generosa disponibilidade e pelas animadoras palavras.

Aos técnicos do Laboratório de Construções, Estruturas e Mecânica Estrutural e, particularmente, ao Sr. José António.

Ao Instituto Politécnico de Tomar e à Fundação para a Ciência e Tecnologia que apoiaram a execução da presente tese.

À empresa Amorim Isolamentos S.A. que ofereceu os granulados de cortiça para a realização do trabalho experimental.

Aos colegas da Escola Superior de Tecnologia de Tomar, Cristina Costa, Eng.º António Cavalheiro, Ana Paula, Carla Correia e Professor Jorge Mascarenhas.

Aos meus amigos, especialmente, à Inês Serrano, ao Carlos, à Ana Carvalho, à Graciete, à Helena Henriques e à Mónica.

Aos meus familiares, em particular, aos tios Carlos e Leonor pela generosidade do seu acolhimento e aos meus «irmões» por todos os valiosos momentos que passamos juntos.

Aos meus pais, referências primeiras na minha existência. À minha mãe por tudo o que representa para mim e pelo apoio incondicional ao longo da minha vida.

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS E ACÚSTICAS DE BETONILHAS COM INCORPORAÇÃO DE CORTIÇA

Resumo

A actividade humana é a principal causa do aquecimento global do Planeta e das consequentes alterações climáticas. Perante este cenário, facilmente se compreende a necessidade imperiosa de reduzir consumos energéticos e incentivar o uso de materiais de baixo impacto ambiental e, assim, diminuir o consumo de matérias-primas e a emissão de gases nocivos. A utilização de materiais que não impliquem demasiados processos industriais poderá, desta forma, minimizar a emissão de gases com efeito de estufa, contribuindo para o desenvolvimento de uma indústria de construção mais sustentável. Nesta perspectiva, a utilização de materiais autóctones e abundantes ou de subprodutos industriais afigura-se uma excelente resposta às preocupações ambientais. Compreende-se, assim, os benefícios que advêm da sua utilização e o interesse nos estudos que investigam as suas potencialidades, como materiais alternativos aos materiais de construção.

A cortiça é um material natural, renovável e reciclável que preenche a totalidade dos requisitos anteriores. Portugal detém a maior mancha florestal de sobreiro do mundo. A cortiça é um material de reduzida massa volúmica, com excelentes propriedades térmicas e acústicas e os seus desperdícios industriais podem ser utilizados como agregados na composição de materiais de base cimentícia, tais como betões, argamassas e betonilhas. As betonilhas convencionais são constituídas por cimento, água e agregados e destinam-se à realização de camadas de forma/enchimento sobre lajes de betão estrutural, podendo, subsequentemente, receber materiais de revestimento, tais como *parquet* de madeira, elementos cerâmicos ou materiais vinílicos.

O presente trabalho centra-se no estudo de betonilhas leves constituídas por cimento, areia e água e nas quais a areia foi parcialmente substituída por desperdícios de cortiça, na forma granular, proveniente da indústria transformadora. Foram desenvolvidas diversas composições que culminaram na definição de três betonilhas leves com distintas dosagens de cimento, areia, água e incorporando agregados de cortiça expandida (ECG) e de três betonilhas com as mesmas dosagens de cimento, mas apenas com areia e água (betonilhas de referência).

O principal objectivo do estudo consistiu na avaliação do desempenho mecânico, higrotérmico e acústico das referidas betonilhas leves com ECG. Para este efeito, foram realizados ensaios laboratoriais, para a caracterização destas betonilhas e para a validação de modelos de simulação numérica que permitam antever os desempenhos térmico e acústico de outras soluções construtivas, não testadas laboratorialmente no âmbito da presente dissertação.

Avaliaram-se experimentalmente a massa volúmica, a resistência mecânica à compressão, a condutibilidade térmica, a permeabilidade ao vapor de água, as curvas de adsorção higroscópica e a absorção de água por imersão parcial. De forma a comparar alguns resultados dos ensaios de caracterização higrotérmica e compreender a influência da presença de ECG em materiais compósitos de base cimentícia, o estudo incluiu, ainda, quatro argamassas constituídas por cimento, água e diversos agregados (*i.e.* agregados de argila expandida, agregados de poliestireno expandido, areia e ECG) e betões leves estruturais com várias proporções de ECG.

As betonilhas leves com ECG foram inseridas em soluções construtivas de pavimento como elemento final de revestimento e simulando camadas resilientes sob lajetas flutuantes. O desempenho acústico destas soluções foi determinado realizando ensaios de isolamento a sons de percussão nas câmaras acústicas verticais do ITeCons. As referidas câmaras foram construídas durante a realização deste trabalho, pelo que se inclui nesta dissertação os trabalhos realizados na preparação e validação desses equipamentos. Realizaram-se, em simultâneo, ensaios para a determinação da rigidez dinâmica aparente destas betonilhas que permitiram relacionar estes resultados com os obtidos nas câmaras acústicas. A validação do modelo numérico com resultados experimentais permitiu concluir que este pode ser aplicado na simulação de outras soluções construtivas, incluindo camadas com as betonilhas leves de ECG.

O comportamento térmico das betonilhas desenvolvidas, em regime dinâmico permitiu, em conjunto com os modelos de simulação numérica, determinar de forma indirecta o seu calor específico. As simulações numéricas dinâmicas permitiram antever o atraso térmico conferido por diferentes sistemas de pavimentos concebidos intercalando as betonilhas leves desenvolvidas.

THEMAL AND ACOUSTIC CHARACTERIZATION OF SCREEDS CONTAINING CORK GRANULES

Abstract

Nowadays, human activity is the main cause of global warming and climate changes. Thus, the sustainability agenda simultaneously demands energy conservation alongside the use of low impact materials to reduce the consumption of raw materials and prevent the emission of the harmful gases that lead to global warming. The use of environmentally friendly materials can help reduce greenhouse gas emissions and therefore encourage the development of a sustainable construction industry. The use of native materials and exploitation of industrial waste are interesting solutions which can address both energy and environment concerns. Indeed, studies on the potential of industrial waste as an alternative to the usual materials are extremely useful for the construction materials industry and the physical and mechanical characterization of such waste materials is essential to understand their behavior and to build suitable mathematical models.

Cork, as a natural resource that is renewable and recyclable, fulfills the above requirements. Portugal has the world's largest supply of cork oak trees. Cork is a low density material and provides excellent thermal and acoustic insulation. Granular cork waste can be used as aggregate in lightweight cementitious composites such as concrete, mortar and screeds. An ordinary screed mixture is usually made of cement, water and aggregate. Screeds can be laid over structural concrete slabs to produce a level surface. Floor coverings such as parquet, ceramic tiles and vinyl carpet can be laid afterwards.

This work explores the possibility of producing lightweight screed with cement mixtures (cement, natural river sand and water) in which the sand is partially replaced with waste cork granules. Several cement-cork formulations were developed, resulting in three lightweight screed mixtures with distinct cement, sand and water contents, and incorporating expanded cork granules (ECG). Three additional mixtures, with the same cement content as the lightweight ones but without cork granules, were prepared and used as reference.

The main purpose of this study was to characterize the mechanical, hygrothermal and acoustic performance of the lightweight cement-cork screeds. Laboratory experiments were performed to characterize them and to validate numerical models to simulate the thermal and acoustic behavior of other constructive solutions.

Hardened density, compressive strength, thermal conductivity, water vapor permeability, adsorption isotherms and water absorption by partial immersion were determined. Four mortars made of cement, water and various aggregates (*i.e.* expanded clay and expanded polystyrene aggregates, sand and ECG) and lightweight concretes with ECG were also studied so as to compare some of the hygrothermal results and understand the influence of the presence of ECG in cementitious mixtures.

The lightweight screeds were included in multilayer floor systems as the final covering and as the resilient layer under floating slabs. The reduction of impact sound pressure levels of the mentioned multilayer systems was experimentally obtained. These tests were carried out in vertical chambers at the Institute for Research and Technological Development in Construction Sciences (ITeCons) facilities. The vertical chambers were constructed during the course of the present work and so the preparatory procedures and their validation are also described.

The dynamic stiffness of the lightweight screeds was determined experimentally to relate it to the results of the tests performed in the vertical chambers. The numerical model was validated by the experimental results, which showed that the validated model can predict the impact sound insulation of other multilayer floor systems that include lightweight screeds with ECG.

The specific heat was obtained indirectly by means of numerical models and monitoring the unsteady state heat conduction through the lightweight screeds. The simulation of the unsteady state heat conduction made it possible to predict the thermal delay of the multilayer systems that include lightweight screeds with ECG.

Índice Geral
Índice de Figuras
Índice de Tabelas
Simbologia

ÍNDICE GERAL

Capítulo 1

Introdução

1.1. Motivação para o Trabalho.....	3
1.2. Objectivos.....	4
1.3 Estrutura da Dissertação.....	6

Capítulo 2

Definição e Caracterização Física e Mecânica de Betonilhas de Cimento com Incorporação de Grânulos de Cortiça

2.1 Introdução.....	10
2.2 Caracterização Física dos Agregados.....	19
2.3 Estudos de Composição de Misturas Cimentícias com Agregados Leves.....	22
2.3.1 Composições Preliminares.....	23
2.3.2 Composições Cimentícias com 80% de Agregados Leves de Cortiça Expandida e 20% de Areia.....	31
2.3.2.1 Massa Volúmica.....	33
2.3.2.2 Resistência Mecânica à Flexão.....	34
2.3.2.3 Resistência Mecânica à Compressão.....	34
2.3.2.4 Análise de Resultados.....	35
2.4 Composição e Fabrico de Betonilhas com Agregados de Cortiça Expandida Destinadas ao Enchimento de Lajes de Pavimento.....	38
2.4.1 Composição e Fabrico das Betonilhas.....	39
2.4.2 Massa Volúmica e Resistência Mecânica.....	40
2.4.2.1 Massa Volúmica Aparente.....	40
2.4.2.2 Ensaios de Resistência Mecânica à Compressão.....	41
2.5 Síntese do Capítulo.....	43
2.6 Referências Bibliográficas.....	44

Capítulo 3*Caracterização Higrotérmica de Betonilhas de Cimento com Incorporação de Grânulos de Cortiça*

3.1. Introdução.....	53
3.2 Condutibilidade Térmica.....	61
3.2.1 Descrição do Equipamento.....	62
3.2.2 Preparação de Provetes e Descrição do Ensaio.....	63
3.2.3 Resultados dos Ensaios.....	64
3.2.3.1 Betonilhas com ECG, M150, M250 e M400 e betonilhas de Referência, R150, R250 e R400.....	64
3.2.3.2 Argamassas BetRef, BetCort, BetArgExp e BetEPS.....	65
3.2.3.3 Síntese de Resultados.....	66
3.3 Retenção de Humidade.....	66
3.3.1 Definição das Curvas Higroscópicas através do Método das Soluções Salinas.....	67
3.3.1.1 Preparação de Provetes e Descrição do Ensaio.....	67
3.3.1.2 Resultados dos Ensaios.....	69
3.3.1.3 Síntese de Resultados.....	72
3.3.2 Definição das Curvas de Retenção através do Método dos Pratos de Pressão.....	73
3.3.2.1 Descrição do Equipamento.....	73
3.3.2.2 Preparação de Provetes e Descrição do Ensaio.....	74
3.3.2.3 Resultados dos Ensaios.....	76
3.4 Transferência de Humidade	78
3.4.1 Permeabilidade ao Vapor de Água através do Método das Tinas.....	78
3.4.1.1 Preparação de Provetes e Descrição do Método de Ensaio.....	79
3.4.1.2 Resultados dos Ensaios.....	82
3.4.1.3 Síntese de Resultados.....	88
3.4.2 Absorção de Água por Imersão Parcial.....	89
3.4.2.1 Preparação de Provetes e Descrição do Método de Ensaio.....	89
3.4.2.2 Resultados dos Ensaios.....	91
3.4.2.3 Síntese de Resultados.....	92
3.5 Síntese do Capítulo.....	92
3.6 Anexo.....	94
3.7 Referências Bibliográficas.....	96

Capítulo 4*As Câmaras do Acústicas Verticais do ITeCons*

4.1. Introdução.....	109
4.2 Descrição das Câmaras Acústicas Verticais.....	110
4.2.1 Câmara Vertical Fixa.....	112
4.2.2 Câmara Vertical Móvel.....	113
4.2.3 Equipamentos de Ensaio.....	114
4.3. Preparação e Caracterização das Câmaras Verticais.....	117
4.3.1 Tempo de Reverberação, T_r	117
4.3.2 Valor Máximo do Índice de Redução Sonora das Câmaras, $R'_{máx}$	120
4.3.2.1 Pavimento do Tipo A.....	121
4.3.2.2 Pavimento do Tipo C.....	122
4.4 Caracterização da Laje de Referência de Betão Armado (Laje do ITeCons).....	123
4.4.1 Isolamento Sonoro a Sons Aéreos.....	124
4.4.2 Isolamento Sonoro a Sons de Percussão.....	125
4.4.3 Factor de Perdas Total, η_{total}	126
4.5 Síntese do Capítulo.....	129
4.6 Referências Bibliográficas.....	130

Capítulo 5*Comportamento Acústico de Soluções Construtivas de Pavimentos Integrando as Betonilhas Seleccionadas*

5.1. Introdução.....	135
5.2 Avaliações Experimentais.....	141
5.2.1 Determinação Experimental da Redução da Transmissão de Sons de Percussão, ΔL_w	141
5.2.1.1 Procedimentos Experimentais.....	141
5.2.1.2 Preparação de Provetes e Equipamentos de Ensaio.....	144
5.2.1.3 Apresentação e Análise de Resultados.....	146
5.2.2 Determinação Experimental da Rigidez Dinâmica Aparente, s'_t	153
5.2.2.1 Preparação de Provetes e Descrição dos Procedimentos de Ensaio.....	154
5.2.2.2 Apresentação e Análise de Resultados.....	155
5.2.3 Discussão dos Resultados Experimentais.....	157
5.3 Modelo Analítico.....	158

5.3.1 Formulação do Problema.....	158
5.3.2 Resultados Analíticos.....	160
5.4 Síntese do Capítulo.....	162
5.5 Anexo.....	163
5.6 Referências Bibliográficas.....	169

Capítulo 6

Comportamento Térmico em Regime Variável e Permanente de Soluções Construtivas de Pavimentos Integrando as Betonilhas Seleccionadas

6.1 Introdução.....	177
6.2 Soluções Analíticas.....	179
6.3 Procedimentos Experimentais.....	182
6.3.1 Massa Volúmica e Condutibilidade Térmica.....	182
6.3.2 Calor Específico.....	183
6.4 Atraso Térmico e Transmissão de Calor de Sistemas de Pavimentos.....	189
6.5 Síntese do Capítulo.....	199
6.6 Referências Bibliográficas.....	200

Capítulo 7

Considerações Finais

7.1 Síntese das Conclusões.....	205
7.2 Perspectivas de Trabalhos Futuros.....	210

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 2.1 - Curvas de análise granulométrica, de acordo com as normas NP EN 933-1:2012 [56] e NP ISO 2030:2011 [59].	19
Figura 2.2 - Picnómetro e balança electrónica usados para determinar a massa volúmica e absorção de água da areia branca: a) Pesagem do picnómetro com água e agregados; b) Pesagem do picnómetro com água.	20
Figura 2.3 - Picnómetros usados para determinar a massa volúmica e absorção de água do ECG.	21
Figura 2.4 - Absorção de água em percentagem de massa seca.	21
Figura 2.5- Amassador mecânico utilizado para o fabrico das misturas experimentais.	22
Figura 2.6 - Mistura experimental conformada em molde prismático 40×40×160 mm ³ .	22
Figura 2.7 – Máquina universal.	26
Figura 2.8 - Massa volúmica das argamassas aos 7 dias de idade em função da dosagem de cimento.	27
Figura 2.9 - Ensaio de resistência mecânica: a) Resistência à flexão; b) Resistência à compressão.	28
Figura 2.10 - Resistência mecânica média à flexão das misturas experimentais aos 7 e 28 dias de idade.	29
Figura 2.11 - Resistência mecânica média à compressão dos betões experimentais aos 7 e 28 dias de idade.	30
Figura 2.12- Formação de grumos nas misturas com areia britada: a) Mistura no interior da betoneira; b) Aspecto de grumo, decorridos 7 dias após o fabrico da mistura.	32
Figura 2.12 - Massa volúmica (em função da quantidade de cimento) determinada nos provetes prismáticos, aos 7 e aos 28 dias de idade.	33
Figura 2.13 - Massa volúmica (em função da quantidade de cimento) determinada nos provetes cúbicos, aos 7 e aos 28 dias de idade.	33
Figura 2.14 - Resistência mecânica à flexão dos provetes prismáticos aos 7 e aos 28 dias de idade.	34
Figura 2.15 - Resistência mecânica à compressão provetes prismáticos, aos 7 e aos 28 dias de idade.	35
Figura 2.16 - Resistência mecânica à compressão dos provetes cúbicos, aos 7 e aos 28 dias de idade.	35
Figura 2.17 - Superfícies de rotura em duas faces adjacentes de um provete cúbico M23-AR, resultantes do ensaio de resistência mecânica à compressão.	37
Figura 2.18 - Redução percentual da massa volúmica de todas as betonilhas ao longo de 84 dias.	40
Figura 2.20 - Resistência mecânica à compressão das betonilhas.	41
Figura 2.19 - Resistência mecânica à compressão (MPa) vs. massa volúmica (kg/m ³).	42

Capítulo 3

Figura 3.1 – Equipamento usado no ensaio de condutibilidade térmica.	62
Figura 3.2 – Provetes usados no ensaio de condutibilidade térmica.	64
Figura 3.3 - Ensaio de higroscopicidade, no domínio higroscópico: a) Monitorização da humidade relativa no interior o excicador; b) Condicionamento das amostras numa das etapas do ensaio de adsorção.	68
Figura 3.4 – Curvas de adsorção higroscópica das betonilhas leves com ECG, M150, M250 e M400 e da mistura solta de ECG, ECG (3/5+5/10).	69

Figura 3.5 – Curvas higroscópicas de adsorção (linha contínua) e de desadsorção (linha interrompida) de betonilhas fabricadas com agregados minerais (BetRef), com agregados de argila expandida (BetArgExp), com grânulos de poliestireno (BetEPS) e com ECG (BetCort).....	71
Figura 3.6 – Curvas higroscópicas de adsorção (linha contínua) e de desadsorção (linha interrompida) de betões fabricados com agregados minerais (BR), com agregados minerais e introdutor de ar (BAR) e com ECG (BE20, BE25, BE30 e BE40).....	71
Figura 3.7 - Sistema de pratos de pressão usado para a definição das curvas de retenção: a) Aspecto geral do sistema com o recipiente que pode ser submetido a 15 bar de pressão; b) Esquematização do dispositivo dos pratos de pressão.....	74
Figura 3.8 - Ensaio para definição das curvas de retenção: a) Saturação dos provetes em vácuo; b) Provetes sobre o prato cerâmico no interior do recipiente de pressão.....	75
Figura 3.9 – Teor de humidade, u^* (kg/kg), em função da humidade relativa, HR (%), das argamassas fabricadas com agregados minerais (BetRef), com agregados de argila expandida (BetArgExp), com grânulos de EPS (BetEPS) e com ECG (BetCort).....	77
Figura 3.10 – Teor de humidade em massa por unidade de massa, u^* (kg/kg), em função da humidade relativa, HR (%), dos betões estruturais leves fabricados com ECG, BE25, BE30 e BE40.....	77
Figura 3.11 - Procedimento preparatório do ensaio de permeabilidade ao vapor de água, de acordo com a norma EN ISO 12572:2001 [78]: a) Secagem em estufa; b) Condicionamento em câmara climática ($T=23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $HR=50\pm 5\%$).....	80
Figura 3.12 - Esquematização do método das tinas, de acordo com a norma EN ISO 12572:2001 [78].....	81
Figura 3.13 - Preparação de provetes para o ensaio de permeabilidade ao vapor de água, de acordo com o método das tinas: a) Provetes após a desmoldagem; b) Selagem dos provetes.....	81
Figura 3. 14 - Ensaio de permeabilidade ao vapor de água, de acordo com o método das tinas: a) Preparação dos provetes das argamassas BetArgExp; b) Provetes no interior da câmara climática.....	86
Figura 3.15 - Absorção de água por capilaridade; a) Esquematização do ensaio; b) Provede de betão no decurso do ensaio.....	90

Capítulo 4

Figura 4.1 – Câmaras acústicas verticais do ITeCons.....	111
Figura 4.2 - Corte esquemático do sistema de câmaras verticais.....	112
Figura 4.3 - Pormenor das portas de acesso ao interior da câmara fixa.....	113
Figura 4.4 - Sistema de movimentação da câmara vertical móvel.....	114
Figura 4.5 – Equipamentos para emissão de sinais e aquisição de dados.....	115
Figura 4.6 – Microfone rotativo.....	116
Figura 4.7 - Acelerómetro, <i>Brüel & Kjær</i> , referência 752A12 e 752A13.....	116
Figura 4.8 – Fontes sonoras.....	116
Figura 4.9 – Câmara vertical fixa após a correcção dos tempos de reverberação.....	118
Figura 4.10 - Câmara vertical móvel após a correcção dos tempos de reverberação.....	118
Figura 4.11 - Pavimento do tipo A.....	121
Figura 4.12 - Pavimento do tipo C.....	122
Figura 4.13 - Pormenorização do apoio da laje de referência do ITeCons.....	123
Figura 4.14 – Laje e lajetas de referência, em betão armado.....	124
Figura 4.15– Laje de referência do ITeCons.....	126

Figura 4.16 - Martelos de impacto usados para determinar o factor de perdas.....	128
Figura 4.17 - Determinação do factor de perdas da laje de referência.....	128

Capítulo 5

Figura 5.1 - Provete colocado sobre a laje de referência do ITeCons, simulando um sistema de pavimento em que a betonilha leve é aplicada como revestimento aparente (RA): a) Ensaio de percussão no interior da câmara vertical emissora; b) Representação esquemática.....	145
Figura 5.2 – Provete colocado sobre a laje de referência do ITeCons e sob uma lajeta de betão de espessura 0.03 m, simulando um sistema de pavimento com lajeta flutuante sobre a betonilha leve (I): a) Ensaio de percussão; b) Representação esquemática.....	145
Figura 5.3 – Mistura de granulados de cortiça expandida solta (ECG 3/5+5/10) aplicada sobre a laje de referência do ITeCons e sob uma lajeta de betão, simulando um sistema de pavimento com lajeta flutuante sobre grânulos de cortiça (I): a) Ensaio de percussão; b) Representação esquemática.....	145
Figura 5.4 - Redução da transmissão de sons de percussão, ΔL , produzida pela solução que simula um sistema de pavimento com a betonilha leve (M150, M250 e M400) como revestimento aparente (RA): a) Espessura 1.5cm; b) Espessura 3.0 cm; c) Espessura 4.5 cm.....	147
Figura 5.5 - Redução da transmissão de sons de percussão, ΔL , produzida pela solução que simula um pavimento com lajeta flutuante sobre a betonilha leve (M150, M250 e M400) e sobre a mistura de grânulos de cortiça [ECG(3/5+5/10)] (I) : a) Espessura 1.5cm; b) Espessura 3.0 cm; c) Espessura 4.5 cm.....	148
Figura 5.6 – Comparação da redução da transmissão de sons de percussão, ΔL , entre o sistema de pavimento que integra M150 como revestimento aparente (RA) e o sistema de pavimento com a lajeta flutuante sobre M150 (I): a) Espessura 1.5cm; b) Espessura 3.0 cm; c) Espessura 4.5 cm.....	150
Figura 5.7 - Comparação da redução da transmissão de sons de percussão, ΔL , entre o sistema de pavimento que integra M250 como revestimento aparente (RA) e o sistema de pavimento com a lajeta flutuante sobre M250 (I): a) Espessura 1.5cm; b) Espessura 3.0 cm; c) Espessura 4.5 cm.....	151
Figura 5.8 - Comparação da redução da transmissão de sons de percussão, ΔL , entre o sistema de pavimento que integra M400 como revestimento aparente (RA) e o sistema de pavimento com a lajeta flutuante sobre M400 (I): a) Espessura 1.5cm; b) Espessura 3.0 cm; c) Espessura 4.5 cm.....	152
Figura 5.9 – Função de coerência que permite assegurar que os resultados do ensaio de avaliação de rigidez dinâmica aparente são válidos.....	155
Figura 5.10 – Funções de transferência, no domínio da frequência, das amostras com 3.0 cm de espessura: a) M150; b) M250; c) M400.....	156
Figura 5.11 - Esquematização da geometria usada na simulação do isolamento a sons de percussão do pavimento constituído por uma laje de betão, uma camada de regularização constituída por uma betonilha com ECG e uma lajeta de betão.....	159
Figura 5.12 – Resultados analíticos (linhas descontínuas) e resultados experimentais (linhas contínuas) do nível sonoro de percussão na câmara receptora com o sistema de pavimento que integra a betonilha sob a lajeta de betão: a) M150 com 1.5 cm de espessura; b) M150 com 3.0 cm de espessura; c) M150 com 4.5cm de espessura; d) M250 com 1.5 cm de espessura; e) M250 com 3.0 cm de espessura; f) M250 com 4.5cm de espessura; g) M400 com 1.5 cm de espessura; h) M400 com 3.0 cm de espessura; i) M400 com 4.5cm de espessura.....	161
Figura 5.13 — Geometria do problema.....	163

Figura 5.14 – Definição dos potenciais devidos à acção de uma carga vertical 3D: a) Meio sólido; b) Interfaces fluidas.....	164
---	-----

Capítulo 6

Figura 6.1 – Geometria do problema.....	180
Figura 6.2 – Equipamento usado para a determinação experimental do calor específico de materiais homogéneos (Netzsch, modelo DSC200F3).....	183
Figura 6.3 – Sistema de ensaio: a) Placa de EPS com os termopares; b) Placa de EPS e provete de betonilha com os termopares; c) Ensaio no interior da câmara climática.....	185
Figura 6.4 – Variação de temperaturas nas interfaces das camadas dos sistemas, na fase de arrefecimento. Resultados analíticos (linhas contínuas) e experimentais (descontínuas com marcadores) para os sistemas constituídos por: a) EPS e M150; b) EPS e M250; c) EPS e M400.....	187
Figura 6.5 – Variação de temperaturas nas interfaces das camadas dos sistemas, na fase de aquecimento. Resultados analíticos (linhas contínuas) e experimentais (descontínuas com marcadores) para os sistemas constituídos por: a) EPS e M150; b) EPS e M250; c) EPS e M400.....	188
Figura 6.6 – Constituição dos sistemas de pavimentos estudados.....	191
Figura 6.7 – Evolução da fonte de calor.....	192
Figura 6.8 – Resultados analíticos: variação de temperatura na face exposta (linha azul) e na face receptora (linha vermelha com marcadores) para um sistema de pavimento constituído por uma laje de betão de 0.14 m de espessura e uma betonilha M150 de 0.06 m de espessura (Caso1).....	192
Figura 6.9 – <u>Caso 1</u> : Atraso térmico (linhas contínuas) e coeficiente de transmissão térmica (linhas descontínuas), U, do sistema de pavimento: a) Sistemas que incorporam betonilhas leves; b) Sistemas que incorporam betonilhas de referência.....	193
Figura 6.10 – <u>Caso 2</u> : Atraso térmico (linhas contínuas) e coeficiente de transmissão térmica (linhas descontínuas), U, do sistema de pavimento: a) Sistemas que incorporam betonilhas leves; b) Sistemas que incorporam betonilhas de referência.....	194
Figura 6.11 – <u>Caso 3</u> : Atraso térmico (linhas contínuas) e coeficiente de transmissão térmica (linhas descontínuas), U, do sistema de pavimento: a) Sistemas que incorporam betonilhas leves; b) Sistemas que incorporam betonilhas de referência.....	195
Figura 6.12 – <u>Caso 4</u> : Atraso térmico (linhas contínuas) e coeficiente de transmissão térmica (linhas descontínuas), U, do sistema de pavimento: a) Sistemas que incorporam betonilhas leves; b) Sistemas que incorporam betonilhas de referência.....	196
Figura 6.13 – Atraso térmico (linhas contínuas) e coeficiente de transmissão térmica (linhas descontínuas), U, dos sistemas de pavimentos: Casos 1 a 4.....	197

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 2.1 – Aglomerado negro de cortiça (ICB) - principais propriedades.....	17
Tabela 2.2 – Propriedades físicas das areias.....	20
Tabela 2.3 – Propriedades físicas dos agregados de cortiça expandida.....	21
Tabela 2.4 - Mistura com a 50% de areia do rio e 50% de agregados de cortiça expandida 3/5.....	23
Tabela 2.5 - Mistura com 100% de agregados de cortiça expandida 3/5.....	24
Tabela 2.6 - Mistura com 50% de areia do rio.....	24
Tabela 2.7 - Mistura sem agregados minerais.....	24
Tabela 2.8 - Mistura com 80% de ECG de granulometria 3/5 e 20% de areia do rio.....	25
Tabela 2.9 - Mistura com 100% de agregados de argila expandida.....	25
Tabela 2.10 - Mistura com 80% de ECG de granulometria 3/5 e 20% de areia britada.....	25
Tabela 2.11 - Mistura com 100% de areia do rio.....	26
Tabela 2.12 - Mistura com 100% de areia britada.....	26
Tabela 2.13 - Composição das argamassas com agregados leves de cortiça e areia do rio, AR, e britada, AB.....	32
Tabela 2.14- Composição, por metro cúbico, das betonilhas.....	39
Tabela 2.15 – Traço em volume e relação água-ligante (a/c) das betonilhas.....	39
Tabela 2.16 - Massas volúmicas das betonilhas.....	40

Capítulo 3

Tabela 3.1 - Coeficientes de condutibilidade térmica, λ [mW/(m.°C)], das betonilhas com ECG e das betonilhas de referência.....	64
Tabela 3.2 - Coeficientes de condutibilidade térmica, λ [mW/(m.°C)], das argamassas BetRef, BetCort, BetArgExp e BetEPS.....	65
Tabela 3.3 – Dessecante e soluções salinas usadas para condicionar o ambiente, $T=23\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	68
Tabela 3.4 - Pressões de sucção, ΔP (bar), e correspondentes valores de humidade relativa, ϕ (-) (com $\phi=HR/100$) [107].....	75
Tabela 3.5 - Método da tina seca: resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água das betonilhas com ECG, M150, M250 e M400.....	83
Tabela 3.6 - Método da tina seca: valores médios obtidos para a permeância (W) e resistência (Z) à difusão de vapor de água, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (δ) e factor de resistência ao vapor de água (μ), das betonilhas de referência, M150, M250 e M400.....	83
Tabela 3.7 - Método da tina seca: resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água das betonilhas de referência, R150, R250 e R400.....	83
Tabela 3.8 - Método da tina seca: valores médios obtidos para a permeância (W) e resistência (Z) à difusão de vapor de água, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (δ) e factor de resistência ao vapor de água (μ), das betonilhas de referência, R150, R250 e R400.....	84
Tabela 3.9 - Método da tina húmida: resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água das betonilhas com ECG, M150, M250 e M400.....	85

Tabela 3.10 - Método da tina húmida: valores médios obtidos para a permeância (W) e resistência (Z) à difusão de vapor de água, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (δ) e factor de resistência ao vapor de água (μ), das betonilhas de referência, M150, M250 e M400.....	85
Tabela 3.11 - Método da tina húmida: resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água das betonilhas de referência, R150, R250 e R400.....	85
Tabela 3.12 - Método da tina húmida: valores médios obtidos para a permeância (W) e resistência (Z) à difusão de vapor de água, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (δ) e factor de resistência ao vapor de água (μ), das betonilhas de referência, R150, R250 e R400.....	86
Tabela 3.13 - Método da tina seca: valores médios obtidos para a permeância (W) e resistência (Z) à difusão de vapor de água, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (δ) e factor de resistência ao vapor de água (μ), das argamassas, BetRef, BetArgExp e BetEPS.....	87
Tabela 3.14 - Método da tina húmida: valores médios obtidos para a permeância (W) e resistência (Z) à difusão de vapor de água, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (δ) e factor de resistência ao vapor de água (μ), das argamassas, BetRef, BetArgExp e BetEPS.....	87
Tabela 3.15 - Método da tina seca: valores médios obtidos para a permeância (W) e resistência (Z) à difusão de vapor de água, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (δ) e factor de resistência ao vapor de água (μ), das argamassas, BetRef, BetArgExp e BetEPS.....	88
Tabela 3.16 - Método da tina húmida: valores médios obtidos para a permeância (W) e resistência (Z) à difusão de vapor de água, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (δ) e factor de resistência ao vapor de água (μ), das argamassas, BetRef, BetArgExp e BetEPS.....	88
Tabela 3.17 - Coeficientes de absorção de água por imersão parcial, A_w , das betonilhas com ECG, M150, M250 e M400 e das betonilhas de referência, R150, R250 e R400, de acordo com a norma EN ISO 15148:2002 [108].....	91
Tabela 3.18 - Coeficientes de absorção de água por imersão parcial, A_w , de betões estruturais com ECG, BE25, BE30 e BE40, de acordo com a norma EN ISO 15148:2002 [108].....	92
Tabela 3.19 - Composição da argamassa BetRef [104].....	94
Tabela 3.20 - Composição da argamassa BetCort [104].....	94
Tabela 3.21 - Composição da argamassa BetArgExp [104].....	95
Tabela 3.22 - Composição da argamassa BetEPS [104].....	95
Tabela 3.23 - Composição do betão de referência, BR [104].....	95
Tabela 3.24 - Composição do betão com introdutor de ar, BAR [104].....	95
Tabela 3.25 - Composição do betão com ECG, BE20 [104].....	95
Tabela 3.26 - Composição do betão com ECG, BE25 [104].....	96
Tabela 3.27 - Composição do betão com ECG, BE30 [104].....	96
Tabela 3.28 - Composição do betão com ECG, BE40 [104].....	96

Capítulo 4

Tabela 4.1 - Tempos de reverberação finais médios nas câmaras receptora e emissora após a colocação das telas e caixas reverberantes, quando o provete é constituído pela laje de betão armado de referência de 0.140 m de espessura (laje do ITeCons).....	119
Tabela 4.2 - Isolamento sonoro a sons aéreos normalizado com o pavimento do tipo A.....	122
Tabela 4.3 - Isolamento sonoro a sons aéreos normalizado com o pavimento do tipo C.....	123
Tabela 4.4 - Isolamento sonoro a sons aéreos da laje de referência do ITeCons.....	125
Tabela 4.5 - Isolamento sonoro a sons aéreos da laje de referência do ITeCons.....	125

Tabela 4.6 - Isolamento sonoro a sons de percussão da laje de referência do ITeCons.....	125
Tabela 4.7 – Factor de perdas total correspondente à laje de referência do ITeCons, obtido com os martelos A, B e C.....	129

Capítulo 5

Tabela 5.1 - Curva de referência, de acordo com a norma NP EN ISO 717-2:2006 [43].....	143
Tabela 5.2 - Índice de redução da transmissão de sons de percussão, ΔL_w , da solução simula um sistema de pavimento com as betonilhas leves (M150, M250 e M400) como revestimento aparente (RA).....	147
Tabela 5.3 - Índice de redução da transmissão de sons de percussão, ΔL_w , dos pavimentos flutuantes.....	149
Tabela 5.4 - Frequência de ressonância, f_0 (Hz), e rigidez dinâmica aparente, s'_t (MN/m ³) das amostras das betonilhas M150, M250, M400 e de ECG(3/5+5/10).....	156
Tabela 5.5 – Propriedades dos materiais introduzidos no modelo analítico de simulação do sistema de pavimento com a camada intermédia constituída por uma betonilha com ECG.....	160

Capítulo 6

Tabela 6.1 – Coeficiente de condutibilidade térmica, λ , e massa volúmica, ρ_0 , dos materiais que integram as soluções construtivas.....	183
Tabela 6.2 – Sistemas multi-camada usados para a determinação indirecta do calor específico.....	184
Tabela 6.3 – Calor específico, c , e difusividade térmica, K , dos materiais aplicados.....	189

SIMBOLOGIA

Capítulo 2

ρ_a	Massa volúmica do material impermeável (Mg/m^3).
ρ_{rd}	Massa volúmica das partículas secas em estufa (Mg/m^3).
ρ_{ssd}	Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (Mg/m^3).
WA_{24}	Absorção de água (em percentagem de massa seca) após a imersão durante 24 horas (%).
ρ_b	Baridade (Mg/m^3).
v	Percentagem de vazios (%).
ρ_0	Massa volúmica (kg/m^3).
M	Massa (kg).
V	Volume (m^3).
f_{cf}	Resistência à flexão (MPa).
F_f	Força aplicada no ensaio de flexão (N).
d_1, d_2	Dimensões laterais dos provetes, no ensaio de flexão (mm).
f_c	Resistência mecânica à compressão (MPa).
F	Força aplicada no ensaio de compressão (N).
A_c	Área da secção transversal do provete, no ensaio de compressão (mm^2).

Capítulo 3

λ	Coefficiente de condutibilidade térmica [$m.W/(m.^{\circ}C)$].
T	Temperatura ($^{\circ}C$).
HR	Humidade relativa (%).
u	Teor de água em massa por unidade de massa, no domínio higroscópico (kg/kg).
m	Massa de equilíbrio (kg).
m_0	Massa no estado seco (kg).
m_w	Massa de equilíbrio, no domínio super-higroscópico (kg).
ΔP	Pressão de sucção (bar).
φ	Humidade relativa, $\varphi=HR/100$ (-).
u_{vac}	Teor de humidade de saturação em vácuo (kg/kg).
m_{ssd}	Massa no estado saturado (kg/kg).
S_{vac}	Grau de saturação em vácuo.
u^*	Teor de humidade em massa por unidade de massa, no domínio super-higroscópico (kg/kg).
u^*_c	Teor máximo de humidade em massa por unidade de massa, no domínio super-higroscópico (kg/kg).
Δm_{12}	Fluxo de difusão de vapor de água (kg/s).
t	Tempo (s).

g	Densidade do fluxo de difusão de vapor de água [kg/(s.m ²)].
G	Fluxo de difusão (kg/s).
A	Área (m ²).
W	Permeância à difusão de vapor de água [kg/(m ² .s.Pa)].
Δp_v	Diferença de pressão de vapor de água (Pa).
Z	Resistência à difusão de vapor de água [(m ² .s.Pa)/kg].
δ	Coefficiente de permeabilidade ao vapor de água [kg/(m.s.Pa)].
e	Espessura (m).
μ	Factor de resistência ao vapor (-).
δ_a	Coefficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar [kg/(m.s.Pa)].
A_w	Coefficiente de absorção de água [kg/(m ² .s ^{1/2})].
$\Delta m'_{0}$	Ordenada da abcissa zero no gráfico que representa a variação da massa por área em função do tempo (kg).
$\Delta m'_{tf}$	Ordenada correspondente ao instante final do ensaio, no gráfico que representa a variação da massa por área em função do tempo (kg).

Capítulo 4

Tr	Tempo de reverberação (s).
τ	Factor de transmissão sonora.
W_t	Potência sonora transmitida.
W_i	Potência sonora incidente.
R	Índice de redução sonora.
S	Superfície.
I_i	Intensidade do campo sonoro incidente.
I_t	Intensidade do campo sonoro transmitido.
p_s	Pressão sonora no local de emissão.
ρ_0	Massa volúmica do ar.
c_0	Velocidade do ar.
p_r	Pressão sonora no local de recepção.
A_r	Área de absorção total.
τ	Factor de transmissão sonora.
L_s	Nível de pressão sonora na câmara emissora.
L_r	Nível de pressão sonora na câmara receptora.
D	Diferença entre os níveis de pressão sonora medidos entre as câmaras emissora e receptora.
R'_{max}	Índice de redução sonora máximo (dB).
R_w	Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea (dB).
$L_{n,w}$	Índice de redução sonora a sons de percussão (dB).
η_{total}	Factor de perdas total.

T_s	Tempo de reverberação estrutural (s).
f_0	Frequência natural de oscilação (Hz).
m	Massa da mola.
k	Rigidez da mola.
c	Coefficiente de amortecimento da mola.
η_{\min}	Factor de perdas mínimo.
f	Frequência (Hz).

Capítulo 5

ΔL_w	Índice de redução de transmissão sonora a sons de percussão (dB).
$L_{n,r,0}$	Nível de pressão sonora de referência (dB).
$L_{n,r,w,0} = 78\text{dB}$	Índice ponderado no nível de transmissão sonora do pavimento de referência.
L_{med_i}	Nível sonoro médio medido em terço de oitava (dB).
N	Número de medições realizadas.
L_j	Nível sonoro medido correspondente à medição j .
L	Nível médio sonoro corrigido em banda de terço de oitava L_j ao nível sonoro medido correspondente a cada medição j (dB).
L_{sb}	Nível sonoro médio com a fonte a funcionar (dB).
L_b	Nível sonoro médio produzido pelo ruído de fundo (dB).
L_i	Nível sonoro médio corrigido pelo ruído de fundo para a banda de um terço de oitava i (dB).
A	Área de absorção sonora equivalente (m^2).
$A_0 = 10 \text{ m}^2$	Área de absorção sonora equivalente de referência.
L_n	Nível sonoro de percussão no interior da câmara receptora com o revestimento sobre a laje de referência do ITeCons (dB).
$L_{n,0}$	Nível sonoro no interior da câmara receptora, com a máquina de percussão a actuar directamente na laje de referência do ITeCons (dB).
ΔL	Redução da transmissão de sons de percussão produzida pelo revestimento de piso (dB).
$L_{n,r}$	Nível sonoro normalizado do pavimento de referência com o revestimento aplicado (dB).
$L_{n,r,w}$	Índice de isolamento sonoro do pavimento de referência com o revestimento aplicado (dB).
$C_{I,r}$	Termo de adaptação para o pavimento de referência (dB).
$L_{n,r,\text{sum}}$	Soma, numa base energética, dos resultados da medição do nível sonoro normalizado, $L_{n,r}$, nas bandas de terço de oitava entre 100 Hz e 2500 Hz (dB).
$L_{n,r,j}$	Nível sonoro na banda de terço de oitava j correspondente ao pavimento de referência (dB).
s'_t	Rigidez dinâmica aparente (MN/m^3).

f_0	Frequência fundamental de ressonância (Hz).
m'_t	Massa total do provete por unidade de área (kg/m^2).
ρ_0^f	Massa volúmica do fluido.
α^f	Velocidade de propagação das ondas longitudinais no fluido.
ρ_0^S	Massa volúmica do sólido.
α^S	Velocidade de propagação das ondas longitudinais no sólido.
μ	Módulo de elasticidade transversal como número complexo.
β	Velocidade de propagação das ondas transversais.
μ_r	Módulo de elasticidade clássico.
η	Factor de perdas.

Capítulo 6

t_{ob}	Temperatura na superfície externa inferior do sistema multi-camada.
t_{ot}	Temperatura na superfície externa superior do sistema multi-camada.
t	Tempo.
$T(t,y)$	Temperatura.
λ_j	Coefficiente de condutibilidade térmica do meio j .
ρ_j	Massa volúmica do meio j .
c_j	Calor específico do meio j .
K_j	Difusividade térmica do meio j .
ω	Frequência.
h_l	Espessura da camada l .
A_{0j}^t, A_{0j}^b	Amplitudes dos potenciais.
\hat{t}_{0t}	Transformada de Fourier de t_{ot} , no domínio do tempo.
\hat{t}_{0b}	Transformada de Fourier de t_{ob} , no domínio do tempo.
e	Espessura (mm).
$T_{inicial}$	Temperatura inicial.
TP_i	Termopares na interface i do sistema multi-camada.

Capítulo 1

Introdução

ÍNDICE

- 1.1. Motivação para o Trabalho
- 1.2. Objectivos
- 1.3 Estrutura da Dissertação

1.1. MOTIVAÇÃO PARA O TRABALHO

O aquecimento global do planeta deixou de ser uma preocupação restrita à comunidade científica e passou a fazer parte das preocupações quotidianas da Humanidade, dadas as consequências já perceptíveis nos ecossistemas da Terra. Estas alterações, tão alarmantes quanto imediatas, são potenciadas, em boa parte, pelos produtos de combustão que, diária e incessantemente, são lançados na atmosfera, através das actividades humanas e da indústria, sobretudo, se estas dependem de fontes primárias de energia fóssil. Uma forma de mitigar o problema passará por fomentar o uso de matérias naturais, autóctones, abundantes, e que possam ser convertidas em produtos finais sem demasiados e complexos processos de transformação. Na indústria da construção, por exemplo, as vantagens que advêm da utilização deste tipo de matérias são por demais evidentes: evitam-se custos de processamento que inevitavelmente consomem recursos energéticos, dispensam-se custos de transporte que se reflectem não só na oneração do preço final dos produtos obtidos, como na quantidade de substâncias nocivas libertadas para o meio ambiente, e, finalmente, a incorporação de matérias abundantes permite escoar substâncias excedentárias, tais como resíduos industriais que de outra forma, apenas aumentariam o impacto ambiental. Em suma, o desenvolvimento de materiais com tais características contribui inequivocamente para consolidar o modelo de sustentabilidade, inadiável na indústria da construção.

A cortiça, sendo uma matéria-prima renovável, nativa e abundante na floresta portuguesa, corresponde ao perfil de material anteriormente descrito. Trata-se de uma matéria proveniente da casca do sobreiro, concretamente da espécie *Quercus suber* cuja extracção é realizada periodicamente, o que permite preservar a árvore e aumentar a sua longevidade. A sua transformação industrial não envolve praticamente outros recursos energéticos para além dos próprios desperdícios que são usados como combustível nas caldeiras. Os regranulados de cortiça, uma outra categoria de resíduos industriais, resultam do processamento da cortiça em auto-clave e podem ser aproveitados, como agregados leves, para o fabrico de betões e de argamassas.

Por outro lado, e numa perspectiva de funcionalidade dos edifícios construídos, é necessário que dos materiais primários derivem produtos que satisfaçam as actuais exigências funcionais, e também que se lhes adicionem atributos técnicos que respondam de forma eficaz aos crescentes padrões de qualidade exigidos pelos utilizadores. Não obstante a utilização de betões e de argamassas com agregados de cortiça ser uma prática por vezes utilizada na indústria da construção portuguesa, existindo trabalhos publicados em revistas da especialidade, nos quais se estudam os seus comportamentos mecânicos, térmico e acústico, persiste alguma

escassez de informação em determinados domínios de caracterização. Assim se justifica a prossecução e ampliação dos trabalhos de avaliação experimental, designadamente no que se refere a parâmetros por quantificar, de modo a alargar o espectro do seu conhecimento em termos da previsão dos desempenhos mecânico, higrotérmico e acústico, da sua durabilidade, da compatibilidade com outros materiais, complementando o estudo dos elementos essenciais ao dimensionamento, a fornecer aos projectistas. A realização destas avaliações experimentais pode, no entanto, e em não raros casos, implicar avultados investimentos em recursos materiais e despende demasiado tempo, ou, simplesmente ser inviável adequar a técnica experimental às características do material. Nestes casos, tem particular interesse o recurso a modelos de previsão que permitam, a partir de algumas propriedades conhecidas, simular o desempenho desses materiais, partindo do pressuposto que o rigor da simulação dos fenómenos físicos envolvidos depende dos métodos numéricos ou analíticos adoptados.

São diversos os problemas de engenharia civil que podem ser solucionados mediante o conhecimento dos desempenhos higrotérmico e acústico dos materiais de construção. O estudo das propriedades higrotérmicas permite dimensionar edifícios adequados à sazonalidade das condições climáticas, eficientes em termos dos consumos energéticos e adaptados aos requisitos específicos das actividades que se desenvolvem no seu interior. A qualidade acústica dos edifícios, por seu turno, depende do isolamento aos sons aéreos e de percussão dos elementos de compartimentação e do condicionamento acústico dos espaços onde se difundem as ondas sonoras. Os ruídos produzidos nos edifícios pelas actividades quotidianas, quando não contidos por processos de isolamento eficazes, provocam incómodo aos seus ocupantes, podendo estes reflectirem-se em problemas sociais e de saúde, profusamente conhecidos e documentados. Os ruídos de percussão, resultantes do contacto entre duas superfícies rígidas, são os que causam maior incómodo e os que atingem maior alcance em termos de propagação. A limitação da sua transmissão pode ser eficazmente assegurada através da utilização de materiais resilientes, *e.g.* cortiça e seus derivados, nos pavimentos. Estes materiais podem ser aplicados, sob a forma granular, no revestimento dos pisos ou interpostos entre as camadas rígidas do pavimento no designado sistema de pavimento flutuante.

1.2. OBJECTIVOS

A presente dissertação resulta do trabalho realizado no Centro de Investigação em Ciências da Construção (CICC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra e tem como objectivo fundamental contribuir para o desenvolvimento e o estudo de betonilhas de enchimento nas quais sejam aplicados resíduos provenientes da indústria

corticeira, designadamente regranulados de cortiça expandida. O trabalho desenvolvido recorre à avaliação experimental, através da realização de ensaios laboratoriais, e à modelação numérica, com recurso à aplicação de soluções analíticas desenvolvidas no CICC. Os ensaios laboratoriais foram realizados no Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (ITeCons) e no Departamento de Engenharia Civil.

O trabalho experimental que possibilitou a formulação de betonilhas com cortiça desenvolveu-se em duas fases distintas: a primeira que compreende o estudo preliminar de um conjunto de materiais compósitos de base cimentícia, (*i.e.* betões estruturais e argamassas com agregados de cortiça expandida), e a segunda fase que corresponde aos trabalhos realizados para a formulação de betonilhas com agregados de cortiça expandida. A primeira fase do trabalho foi desenvolvida no âmbito do projecto de investigação POCTI/ECM/55889/04, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, tendo o estudo incidido sobre a caracterização de betões leves estruturais e de argamassas, cujas composições foram desenvolvidas no CICC, dando origem a outra dissertação no domínio da caracterização mecânica desses materiais. O presente trabalho contemplou a análise higrotérmica de alguns desses materiais. A segunda fase da investigação, que culminou na definição de três betonilhas leves com cortiça, beneficiou do trabalho realizado anteriormente, designadamente no processo de formulação das composições e, numa fase posterior, possibilitou a comparação dos resultados de caracterização higrotérmica entre os diversos materiais compósitos de base cimentícia estudados.

Pretende-se, assim, aferir a viabilidade da aplicação de betonilhas com agregados de cortiça no enchimento de camadas de forma, averiguando se da sua integração em sistemas de pavimentos acrescem benefícios relativamente às betonilhas convencionais, nomeadamente no que se refere aos desempenhos higrotérmico e acústico e se o seu comportamento mecânico é satisfatório.

Desta forma, as betonilhas leves com cortiça são experimentalmente caracterizadas em termos dos seus desempenhos mecânico e higrotérmico, concretamente a resistência mecânica à compressão, a condutibilidade térmica, a higroscopicidade, a absorção de água e a permeabilidade ao vapor de água. A análise destes resultados experimentais é realizada tendo em consideração tanto os resultados do estudo preliminar (obtidos na primeira fase do trabalho), como também os resultados dos ensaios realizados em três betonilhas de referência, *i.e.* fabricadas com as mesmas dosagens de cimento das betonilhas leves com cortiça, com água e apenas com areia.

A caracterização do desempenho acústico de sistemas de pavimentos que integram as betonilhas com grânulos de cortiça incide na avaliação experimental do índice de redução sonora de sons de percussão. É, ainda, determinada experimentalmente a rigidez dinâmica das

betonilhas com grânulos de cortiça, numa tentativa de relacionar os resultados dos ensaios de percussão, tecnicamente mais complexos e onerosos, com os obtidos através dos ensaios de rigidez dinâmica que envolvem menores recursos. Pelos mesmos motivos, aplica-se, ainda, um modelo numérico para a previsão do isolamento sonoro a sons de percussão aos mesmos sistemas de pavimentos.

Na presente dissertação, incluem-se ainda os trabalhos de preparação e de verificação das câmaras acústicas verticais do ITeCons, recentemente construídas, de modo a possibilitar a realização dos ensaios de avaliação do desempenho ao isolamento sonoro a sons de percussão dos sistemas de pavimentos que integram as betonilhas com agregados de cortiça.

O desempenho térmico dinâmico, nomeadamente o atraso térmico conferido por aqueles sistemas de pavimento, é simulado de forma numérica. Dada a grande variabilidade das betonilhas com grânulos de cortiça, o calor específico foi determinado de forma indirecta, recorrendo, em simultâneo, a trabalho experimental e a simulação numérica do fenómeno de transferência de calor. Para este efeito, é necessário conhecer previamente o coeficiente de condutibilidade térmica, a massa volúmica e o calor específico dos materiais que integram os sistemas de pavimentos estudados.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho desenvolvido no âmbito da presente dissertação está organizado em sete capítulos estruturados autonomamente, de modo a facilitar consultas isoladas.

No primeiro capítulo, procede-se ao enquadramento temático da dissertação, à definição dos objectivos e à apresentação da estrutura adoptada no desenvolvimento da dissertação.

Nos capítulos 2 a 5, descrevem-se os trabalhos realizados e expõem-se os resultados obtidos. Cada um destes capítulos inclui uma introdução específica do tema do capítulo e uma breve exposição do trabalho realizado por outros autores no mesmo domínio de estudo. Apresentam-se, de seguida, os trabalhos desenvolvidos e os resultados obtidos. Cada capítulo termina com referência a uma listagem da bibliografia consultada.

No segundo capítulo, apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais granulares usados na formulação das betonilhas, *i.e.* areia do rio, areia britada e granulados de cortiça expandida, nomeadamente análises granulométricas e correspondentes curvas granulométricas, baridade e volume de vazios, massa volúmica e absorção de água. Este capítulo inclui igualmente a descrição dos estudos preliminares de diversas betonilhas fabricadas com agregados de vários tipos, designadamente as composições das betonilhas, os ensaios realizados e os respectivos resultados obtidos. Estes estudos preliminares conduziram à

formulação da composição de três betonilhas leves com agregados de cortiça expandida e de três betonilhas de referência, fabricadas com as mesmas dosagens de cimento das leves, mas apenas com agregados minerais, bem como à selecção do agregado mineral (areia do rio) e do tipo de ensaio mecânico (ensaios de compressão com provetes cúbicos) que se revelaram mais adequados. O capítulo contém, assim, os resultados dos ensaios de resistência mecânica à compressão, realizados com provetes cúbicos, bem como as massas volúmicas das betonilhas com agregados de cortiça expandida e das betonilhas de referência.

No terceiro capítulo, procede-se à avaliação experimental dos desempenhos higrotérmicos das betonilhas leves com granulados de cortiça expandida, designadamente a condutibilidade térmica, curvas higroscópicas de adsorção, permeabilidade ao vapor de água e absorção de água por imersão parcial. Estes resultados são comparados com alguns resultados de caracterização higrotérmica realizados em betões estruturais e em argamassas leves e que integraram uma fase preliminar do presente trabalho, como já se explicou na secção 1.2.

No quarto capítulo, são descritos todos os trabalhos preparatórios efectuados nas câmaras acústicas verticais do ITeCons, imediatamente após a sua construção, e destinados ao estabelecimento da sua conformidade, para aí poderem ser realizados ensaios de isolamento sonoro normalizados. Este capítulo inclui a descrição das instalações de ensaio, dos equipamentos usados para a verificação das especificações normativas aplicáveis, dos trabalhos preparatórios e os resultados dos ensaios de caracterização das instalações.

O quinto e o sexto capítulos focam-se no estudo dos desempenhos acústico e térmico de soluções construtivas, *i.e.* sistemas de pavimentos estratificados que integram uma laje de betão armado e as betonilhas leves e de referência, nas camadas de forma.

No quinto capítulo, avalia-se a eficácia do isolamento sonoro aos sons de percussão dos referidos sistemas de pavimentos, através da determinação experimental do índice de redução de transmissão de sons de percussão, e do ensaio de rigidez dinâmica em amostras de pequenas dimensões. Esta abordagem experimental é complementada com um modelo de previsão de isolamento aos sons de percussão, em que se procede à simulação do comportamento dinâmico do sistema de transmissão do som, mediante a aplicação de uma força de impacto que está na origem da excitação do meio de transmissão. Os resultados das modelações são analisados e comparados com os dos ensaios de percussão realizados nas câmaras verticais. A discussão de resultados é apresentada na parte final do capítulo.

No sexto capítulo, determina-se o comportamento térmico dos mesmos sistemas estratificados de pavimentos e de sistemas estratificados que adicionalmente integram aglomerado de cortiça expandida (ICB), quando submetido a um regime permanente e variável. A transferência de calor por condução através dos referidos sistemas de pavimentos é simulada

através de uma formulação analítica que utiliza funções de Green. O conhecimento da condutibilidade térmica e da massa volúmica dos materiais que integram os sistemas de pavimento estudados, designadamente das betonilhas estudadas neste trabalho, é imprescindível para a concretização do referido modelo analítico. Para tal, são usados os resultados experimentais de massa volúmica e de coeficiente de condutibilidade térmica determinados e apresentados nos capítulos anteriores. O calor específico, também necessário para o estudo dinâmico, é obtido de forma indirecta, através da utilização conjunta dos resultados obtidos por via experimental e por via numérica. Diferentes simulações numéricas permitem verificar a importância da utilização de betonilhas com a incorporação de grânulos de cortiça.

No sétimo e último capítulo, sintetiza-se o trabalho realizado e coligem-se as principais conclusões, aludindo aos possíveis futuros desenvolvimentos.

Capítulo 2

Definição e Caracterização Física e Mecânica
de Betonilhas de Cimento com Incorporação
de Grânulos de Cortiça

ÍNDICE

- 2.1 Introdução
- 2.2 Caracterização Física dos Agregados
- 2.3 Estudos de Composição de Misturas Cimentícias com Agregados Leves
 - 2.3.1 Composições Preliminares
 - 2.3.2 Composições Cimentícias com 80% de Agregados Leves de Cortiça Expandida e 20% de Areia
 - 2.3.2.1 Massa Volúmica
 - 2.3.2.2 Resistência Mecânica à Flexão
 - 2.3.2.3 Resistência Mecânica à Compressão
 - 2.3.2.4 Análise de Resultados
- 2.4 Composição e Fabrico de Betonilhas com Agregados de Cortiça Expandida Destinadas ao Enchimento de Lajes de Pavimento
 - 2.4.1 Composição e Fabrico das Betonilhas
 - 2.4.2 Massa Volúmica e Resistência Mecânica
 - 2.4.2.1 Massa Volúmica Aparente
 - 2.4.2.2 Ensaios de Resistência Mecânica à Compressão
- 2.5 Síntese do Capítulo
- 2.6 Referências Bibliográficas

2.1 INTRODUÇÃO

A utilização de materiais compósitos, constituídos pela mistura de materiais granulares minerais, água e um aglomerante, como materiais construção remonta à pré-história, tal como é confirmado através de estudos arqueológicos de pavimentos térreos realizados em algumas habitações em Lepenski Vir (5600 a.c.), localizada nas margens do rio Danúbio, na actual Sérvia. Estes materiais foram, indubitavelmente, os precursores dos actuais betões e que genericamente, são obtidos pela mistura dos referidos constituintes e, eventualmente, adjuvantes, em quantidades adequadas [1]. Originalmente, apenas, eram utilizados agregados naturais de origem mineral, *i.e.* areias e britas, procedentes, consoante os casos, de leitos aluvionares ou de pedreiras. Todavia, na actualidade, o esgotamento das fontes de recursos naturais e consequentes imposições para a protecção do meio ambiente, bem como a oneração do preço final devido aos custos de transporte, têm motivado a procura de outros materiais granulares [2], tais como agregados de pedra-pomes, de tufo, de argila expandida ou de perlite expandida¹ [4]. Os agregados mencionados têm a particularidade de apresentarem massas volúmicas mais reduzidas do que as convencionais britas e areias. São, por esse motivo, designados agregados leves². Na prática, a substituição de agregados convencionais por agregados leves no fabrico de materiais compósitos é uma realidade há centenas de anos [6-8]. A redução da massa volúmica dos agregados traduz-se, genericamente, na diminuição da resistência mecânica dos materiais compósitos que os integram, o que poderá ser interpretado como uma desvantagem. Há, no entanto, que considerar algumas vantagens que advêm da sua utilização: o desempenho térmico é melhorado, uma vez que os agregados leves permitem reduzir o valor do coeficiente de condutibilidade térmica do material compósito [9-17], diminuir o peso próprio das estruturas e, consequentemente das dimensões dos elementos estruturais e os custos directos de construção³ [9], [18-21]. Outros benefícios podem ainda ser acrescidos, designadamente a melhoria do comportamento acústico dos edifícios [19], [22], [23] e também os que sobrevêm da redução do peso próprio dos edifícios: menor consumo de materiais e de energia necessária ao seu processamento e menores danos provocados pela aceleração sísmica já que, neste caso, as forças actuantes são proporcionais à massa das estruturas. Estas vantagens permitem reduzir os custos totais de construção, bem como economizar recursos energéticos e diminuir, consideravelmente, a emissão de substâncias nocivas para o meio ambiente.

Os agregados leves podem integrar camadas de forma. Estas destinam-se, essencialmente, a regularizar superfícies, formar pendentes e preencher vazios para definir as espessuras de projecto. As camadas de forma, também designadas camadas de enchimento ou de

¹ A perlite expandida é obtida por expansão térmica da pedra-pomes [3].

² Os agregados são classificados de leves se a sua massa volúmica for inferior a 2000 kg/m³ [5].

³ Consideram-se custos directos de construção os que advêm do custo dos materiais incorporados na edificação.

regularização, por não serem elementos estruturais, podem ser constituídas por betonilhas leves. Actualmente, as betonilhas leves mais utilizadas na construção convencional portuguesa são produzidas com agregados de argila expandida e com grânulos de poliestireno expandido. Todavia, o processamento destes materiais implica elevados consumos energéticos, repercutindo-se no seu custo global final.

A revisão bibliográfica revela uma diversidade de trabalhos relativos ao desempenho de betões e de argamassas fabricados com agregados leves de diversas origens: minerais, tais como pedra-pomes [7], [8], [24], perlite [13], [14], argila expandida [18], diatomitos [3], [16], [25] ou micro esferas cerâmicas [26]; desperdícios resultantes de indústrias transformadoras, *e.g.* cenosferas [19], [27], cinzas volantes ou cascas de frutos [12]; materiais poliméricos, como espuma de poliuretano ou poliestireno expandido [17], [28] e ainda da reutilização e/ou reciclagem de materiais demolidos, como por exemplo blocos desmantelados de betão leve [29]. Em trabalhos distintos, Yasar *et al.* [24] e Gündüz [7] concluíram ser possível incorporar agregados de pedra-pomes em betões estruturais e não estruturais. Hossain *et al.* [30] formularam duas séries de betões leves com agregados de pedra-pomes: numa das séries procederam à substituição do volume de brita por 0, 50, 75 e 100% de pedra-pomes, enquanto na outra série, usaram cimento Portland misturado com 20% de pedra-pomes finamente moída, pedra-pomes grosseiramente triturada e areia. Com este trabalho os autores confirmaram a viabilidade de fabricar betões leves com pedra-pomes e demonstraram que a sua utilização nas zonas de origem, *i.e.* regiões vulcânicas, permite reduzir os custos de construção. Khedari *et al.* [12] incorporaram cascas de coco e de durião⁴ sob a forma de fibras em pastas de cimento, areia e água para fabricar betões leves, tendo determinado experimentalmente a condutibilidade térmica dos betões assim fabricados. Estes autores concluíram que a introdução destas fibras reduz a condutibilidade térmica e a massa volúmica dos betões estudados. Lima *et al.* [29] avaliaram a influência da introdução de agregados provenientes de resíduos de demolição e de solas de sapatos usados, tendo para tal fabricado betões leves com os referidos agregados, brita, areia e cimento nas seguintes dosagens 424, 329 e 252 kg/m³. Estes betões foram avaliados relativamente à sua densidade e resistências mecânicas, à compressão e flexão, tendo os autores concluído ser viável a utilização deste tipo de resíduos na produção de betões leves e de betões convencionais.

À semelhança dos agregados leves referidos, também a cortiça pode ser usada como agregado na composição de betões e de argamassas. É uma matéria-prima renovável, reciclável e reutilizável utilizada no processamento de diversos produtos de áreas da indústria tão distintas como a construção civil, aeronáutica, naval, espacial, pescas, alimentar ou do calçado. Esta

⁴ O durião é um fruto comestível da árvore com o mesmo nome da família das bombacáceas, nativa da Malásia, de folhas coriáceas, flores brancas e cápsulas espinhosas, que pesam alguns quilogramas [31, pp. 1414].

vasta gama de aplicações advém de um conjunto de propriedades morfológicas e químicas do tecido suberoso que constitui a cortiça [32]. A maior limitação da cortiça parece residir na sua baixa resistência mecânica. No entanto, esta aparente desvantagem é colmatada por características e propriedades singulares que a projectam para um vasto domínio de aplicações que vão desde produtos de custos reduzidos (*e.g.* palmilhas para sapatos), até materiais muito valorizados e de tecnologia de ponta (*e.g.* nos sistemas de protecção passiva contra incêndios de barcos e de submarinos de guerra ou nos escudos de protecção térmica de aeronaves de prospecção espacial). Na indústria da construção, a cortiça é essencialmente aplicada em isolamentos térmicos, revestimentos de pavimentos, tectos falsos, juntas de dilatação, elementos de compartimentação, como material resiliente sob lajes flutuantes e como material antivibrático, dada a sua eficiência na atenuação de solicitações de origem mecânica.

A cortiça, matéria leve e flexível, provém da casca de duas espécies de sobreiro: *Quercus suber* e *Quercus occidentalis*. O sobreiro cresce espontaneamente na bacia mediterrânica, designadamente na Península Ibérica. Portugal assume-se como o maior produtor de cortiça, com mais de 50% da produção mundial, detendo cerca de 40% da floresta de sobreiros, na sua grande maioria, da espécie *Quercus suber* [33]. O sobreiro, árvore de folhas perenes, está perfeitamente adaptado à escassez de água dos Verões mediterrâneos, quer pela redução do seu metabolismo, quer pelo elevado nível de hidratação assegurado com o seu peculiar sistema radicular que se desenvolve tanto na horizontal como em profundidade, de forma a captar eficazmente água a partir dos pontos mais distantes. A estas características morfológicas acrescem notáveis propriedades de isolamento térmico que asseguram a protecção da árvore contra incêndios florestais, possibilitando, dessa forma, a sua rápida renovação sem a necessidade de retornar a um estágio de desenvolvimento inicial, como acontece com a maioria das outras espécies que, em caso de incêndio, somente se regeneram a partir das suas sementes ou da base do seu caule [34].

A cortiça obtém-se da extracção da casca do sobreiro que é realizada periodicamente, em ciclos entre 9 e 14 anos [34], [35], estimando-se que, em média, sejam possíveis, com retorno económico, 16 descortiçamentos ao longo da vida da árvore que pode viver até 350 anos. Do primeiro descortiçamento, efectuado quando o sobreiro atinge entre 20 e 35 anos de idade, obtém-se a cortiça virgem, de estrutura irregular, aproveitada, por esse motivo, para o processamento de aglomerados. O descortiçamento seguinte produz a cortiça de segunda geração, *segundeira* ou *secundeira*, com constituição pouco regular, *i.e.* apresentando grande número de sulcos verticais que limitam o seu processamento industrial. Em descortiçamentos posteriores, obtém-se a cortiça de melhor estrutura, designada por cortiça amadia, que apresenta espessura uniforme, permitindo uma multiplicidade de aplicações. Após a extracção da árvore, as pranchas encurvadas de cortiça são submetidas a cozedura, de forma a eliminar tensões

residuais, diminuir o tamanho dos poros e atenuar o arco das placas. A cortiça, assim processada, integrará duas categorias de produtos: cortiça natural e aglomerados de cortiça. Entendem-se como produtos de cortiça natural, *e.g.* rollhas, os que, após a cozedura, apenas implicam o corte e acabamento, e como produtos aglomerados os que resultam do aproveitamento dos desperdícios dos primeiros. Os aglomerados absorvem ainda a cortiça, sob a forma de granulados, que não passa no crivo de qualidade da indústria transformadora e a cortiça virgem e *segundeira*. Os desperdícios de cortiça, depois de triturados, são separados em função da sua granulometria e massa volúmica, *e.g.* os de granulometria mais fina podem ser usados como combustível em caldeiras industriais e no fabrico de linóleo⁵. Importa referir que os aglomerados de cortiça incorporam cerca de 75% da produção de cortiça [34], [36], factor que evidencia ser esta uma das indústrias que mais valorizam a sua matéria-prima. Em paralelo, a pesquisa de novas aplicações de resíduos de cortiça continua a estimular o interesse dos investigadores, tal como é confirmado através dos trabalhos de Eires *et al.* [37], de Kanawade e Gaikewad [38] e de Carvalho *et al.*[39].

Os aglomerados de cortiça podem ser divididos em compostos e em puros. Os aglomerados compostos, também designados por aglomerados brancos, são formados por granulados de cortiça aglutinados por um ligante, *e.g.* poliéster, poliamida, poliuretano, resinas fenólicas ou resinas epoxídicas, sob o efeito da temperatura, e são empregues na produção de rollhas de cortiça aglomerada e em folhas aglomeradas destinadas a revestimentos de pavimentos e de paredes. Existem ainda os aglomerados compostos com a adição de borracha⁶, conhecidos por *rubbercork*, e usados em revestimentos, no isolamento de vibrações e como selante de juntas nos motores de combustão. Gil [36] apresenta uma sinopse dos principais aglomerados compostos de cortiça, bem como das respectivas aplicações, designadamente dos produtos existentes no mercado e dos desenvolvidos nos últimos anos, mas que ainda permanecem fora do circuito comercial. Os aglomerados puros, ou aglomerados negros, são processados em auto-clave, sob pressão de vapor de água (a cerca de 40 kPa), aproveitando as propriedades aglutinantes da exsudação da cortiça à temperatura de 350°C. Durante este processo verifica-se uma expansão das partículas de cortiça, resultando daqui a designação de aglomerados de cortiça expandida, vulgarmente designados ICB⁷. Os aglomerados puros são usados essencialmente em materiais de isolamento térmico e acústico, sob a forma de placas ou de granulados, em apoios antri-vibráticos e, em casos específicos, como absorventes sonoros em soluções de correcção acústica.

⁵ O linóleo é fabricado, desde finais do século XIX, a partir de partículas de cortiça, resina, óxidos de chumbo ou óxidos de magnésio e corantes.

⁶ Borracha acrílica (ACM/AEM), borracha de butadieno estireno (SBR) e borracha nitrílica (NBR).

⁷ ICB - *Insulation Cork Board*.

A cortiça é um material celular⁸ cujo modelo tridimensional simplificado se baseia numa estrutura em favos de mel orientados segundo a direcção radial e cujas bases das células se dispõem perpendicularmente a esta direcção. No que se refere à sua composição química, esta está bem documentada [32], [40-42], não sendo desenvolvida na presente dissertação. A estrutura celular a par da presença da suberina, principal componente nas paredes das células, são determinantes na definição das propriedades da cortiça, promovendo a sua diferenciação relativamente a outros materiais lenhocelulósicos, como é o caso da madeira⁹.

A massa volúmica da cortiça natural apresenta valores reduzidos, entre 120 e 250 kg/m³ [32], [40], que podem variar em função de diversos factores tais como as condições de crescimento da árvore, a sua idade¹⁰, a época de crescimento, a preparação da matéria-prima¹¹ ou o tipo de processamento industrial. Trata-se de um material anisotrópico e viscoelástico. O comportamento viscoelástico da cortiça varia em função do seu teor em água¹² [32].

A cortiça tem a capacidade de absorver quantidades significativas de água, sob a forma líquida e sob a forma de vapor. No entanto, dada a sua anisotropia, a absorção ocorre a velocidades diferentes. Uma vez no seu interior, a água altera as propriedades da cortiça.

A reduzida condutibilidade térmica da cortiça é sobejamente conhecida. Esta será certamente a propriedade térmica mais divulgada e da qual o Homem tira proveito há mais tempo. A sua estrutura celular, que anula a componente devida à convecção do ar, explica a baixa condutibilidade térmica e a consequente generalização da sua utilização como material termicamente isolante. O teor de humidade da cortiça influencia a sua condutibilidade térmica: Srinivasan e Wijesundera [43] avaliaram a transferência de calor através de placas de cortiça com diferentes teores de humidade, tendo para isso condicionado previamente as amostras. Estes investigadores concluíram que a condutibilidade térmica das placas de cortiça aumenta, à medida que se aumenta o seu teor de humidade. De acordo com Gil e Silva [44], as propriedades térmicas da cortiça mantêm-se ao longo do tempo, tal como foi demonstrado com a pesquisa na qual avaliaram o desempenho térmico de placas de cortiça provenientes da demolição das câmaras frigoríficas de uma indústria de pesca¹³, em Lisboa, após mais de 40 anos de utilização. No estudo que Castro *et al.* [45] realizaram, evidenciam-se as vantagens, em termos de isolamento térmico, do aglomerado composto de cortiça, relativamente a outros

⁸ Como material celular entende-se uma classe de materiais na qual é possível identificar estruturas celulares responsáveis pelas propriedades específicas desses materiais.

⁹ Na madeira o principal componente estrutural é a celulose que representa 50% dos componentes estruturais, enquanto na cortiça a celulose corresponde a 9% e a suberina a 44% dos componentes estruturais [32].

¹⁰ A cortiça virgem apresenta maior massa volúmica do que a cortiça *amadia*.

¹¹ A cortiça depois de submetida a cozedura apresenta menor massa volúmica.

¹² A dependência da viscoelasticidade em relação ao teor de humidade da cortiça pode ser ilustrado através de uma rolha de cortiça dentro do gargalo de uma garrafa que quando removida, apresenta na parte inferior, com maior teor de humidade, maior diâmetro, apesar de no interior do gargalo se apresentar dimensionalmente uniforme.

¹³ *Docapesca*.

materiais de uso mais generalizado na constituição do núcleo de painéis *sandwich*, para aplicações em aeronaves.

No domínio das propriedades acústicas, a cortiça natural e os aglomerados brancos sendo materiais celulares de porosidade fechada apresentam coeficientes de absorção sonora inferiores aos dos aglomerados negros de cortiça cuja porosidade é aberta. Esta aptidão, dos materiais de poros abertos, resulta da conjugação de vários mecanismos, entre os quais a dissipação devida à viscosidade do ar no interior dos poros e o amortecimento decorrente do comportamento viscoelástico do material. A cortiça e, designadamente, os aglomerados puros de cortiça são correntemente utilizados na correcção acústica de espaços. Asdrubali [46] apresenta uma compilação de materiais classificados como sustentáveis e acusticamente eficientes em termos de absorção do som, entre os quais se encontra a cortiça. Concomitantemente, os materiais celulares têm a capacidade de absorver energia mecânica gerada na sequência de acções de vibração. Assim, a cortiça e os seus aglomerados podem ser usados com eficiência como material resiliente em sistemas de pavimentos flutuantes, sendo, aliás, esta uma prática corrente, na indústria da construção.

O material de refugo da indústria corticeira, *i.e.* os desperdícios de cortiça amadia utilizada nos produtos de cortiça natural e as aparas resultantes do corte das pranchas, assim como as cortiças virgem e segundeira são triturados para a obtenção de granulados brancos ou de cortiça natural que, posteriormente, são separados em função da sua granulometria. Por outro lado, dos aglomerados puros ou negros, processados em auto-clave, também resultam desperdícios¹⁴, sob a forma de granulados – os regranulados. Na construção civil, os granulados de cortiça para além de incorporarem os aglomerados, *e.g.* presentes em diversos produtos de isolamento térmico, também são usados, na forma solta, na preparação de betões e de argamassas e como material de enchimento. A utilização de agregados de cortiça no fabrico de betões e de argamassas é, pois, uma prática comum na indústria da construção. Apesar deste facto, a pesquisa bibliográfica realizada demonstrou que os estudos, referentes ao desempenho deste tipo de materiais compósitos, são manifestamente escassos.

Os regranulados (ou granulados) de cortiça expandida (ECG), material de refugo da indústria corticeira, apresentam elevada resistência a agentes químicos. Sem prejuízo das suas propriedades físicas, a temperatura de serviço deste tipo de granulados varia entre (-180) e 100°C. Outra das particularidades a assinalar refere-se ao facto de os regranulados não libertarem gases tóxicos, quando em combustão. Na Tabela 2.1, apresentam-se as principais propriedades de aglomerado negro de cortiça, reunidas a partir das fontes consultadas.

¹⁴ Os desperdícios dos aglomerados puros resultam das aparas resultantes do processamento industrial bem como da “regranulação” das placas defeituosas.

Tabela 2.1 – Aglomerado negro de cortiça (ICB) - principais propriedades.

Propriedade		Ref. Bibliográfica
Massa volúmica [kg.m ⁻³]	100-130	[40]
	80-320	[32]
Módulo de Young [MPa]	1-8	[32]
Coeficiente de Poisson	≅ 0	[32], [40]
	0.04	[47]
Condutibilidade térmica [W.(m.K) ⁻¹]	0.035-0.070	[32]
	0.045 ¹⁵	[48]
Calor específico a 20°C [kJ.(kg.K) ⁻¹]	1.7-2.1	[40]
Permeabilidade ao vapor de água ×10 ⁻¹² [kg.(Pa.s.m) ⁻¹]	4.2-12	[40]
	10.4 ¹⁶	[49], [50]

A correcta compreensão dos fenómenos associados à presa da pasta de cimento com agregados de cortiça, assim como a avaliação do desempenho deste tipo de betões e de argamassa são essenciais para o desenvolvimento e diversificação das suas aplicações. Neste domínio de estudo, em 1979 Azziz *et al.* [51] para além de terem avaliado a resistência mecânica de betão fabricado com grânulos de cortiça, também confirmaram a compatibilidade entre pasta de cimento e agregados de cortiça. Estudos posteriores, concretamente de Karade *et al.* [34], [52] confirmaram a referida compatibilidade entre a pasta de cimento e os granulados de cortiça. Da comparação da compatibilidade química de pastas de cimento adicionadas com partículas de madeira e de cortiça, Karade *et al.* [34] concluíram que na pasta cimentícia com cortiça se desenvolvem ligações químicas mais estáveis durante a fase de endurecimento. No estudo publicado em 2006, Karade *et al.* [52] demonstraram igualmente que a massa volúmica, a granulometria e a quantidade de agregados influenciam de formas distintas as reacções de hidratação das pastas analisadas.

Recentemente, Costa [53] analisou a influência da presença de cortiça na variação da resistência mecânica à compressão, massa volúmica, absorção de água, velocidade de penetração de cloretos, degradação após vários ciclos gelo-degelo e resistência residual após a acção de temperaturas elevadas, em betões estruturais fabricados com diversas quantidades de ECG de várias granulometrias. Os resultados deste trabalho indicaram que a substituição de areia por ECG não só não afecta a sua resistência à acção de cloretos, como apresenta efeitos benéficos na prevenção da degradação do betão por acção de ciclos gelo-degelo e na sua resistência mecânica à compressão, quando os betões são sujeitos a temperaturas elevadas. Panesar e Shindman [54] caracterizaram as propriedades físicas e mecânicas de 10 argamassas e

¹⁵ Para massas volúmicas: 90 – 140 kg/m³.

¹⁶ Para massas volúmicas: 100 – 150 kg/m³.

de 9 betões fabricados com resíduos de cortiça, nos estados plástico e endurecido, designadamente o abaixamento, a massa volúmica, a resistência mecânica à compressão, o módulo de elasticidade, a permeabilidade a cloretos e a resistência térmica. Os betões foram fabricados com 400 kg/m^3 de cimento, com a razão água cimento (a/c) igual a 0.40, com 35% de agregados grossos, em volume, com super-plastificante e redutor de água. As argamassas foram preparadas com traço 1:2 e a/c=0.40. A cortiça usada, na forma granular, proveio de rolhas de garrafas, tendo os grânulos de cortiça sido condicionados a temperaturas e humidades elevadas. Neste trabalho, os autores substituíram 0, 10 e 20% de areia por cortiça, nas argamassas, e as mesmas percentagens de areia e de agregados grossos por cortiça, nos betões. Panesar e Shindman [54] concluíram que a exposição da cortiça a temperaturas elevadas, entre 50 e 100°C, resulta na diminuição da resistência mecânica do betão e que a quantidade de cortiça incorporada no betão é mais preponderante do que a sua granulometria na definição da resistência mecânica, micro-estrutura e resistência térmica do betão. Os mesmos autores verificaram ainda que os compósitos com cortiça revelam elevada vulnerabilidade à acção de cloretos. Carvalho *et al.* [55] estudaram o comportamento de argamassas com a incorporação de resíduos de cortiça na forma granular, em substituição parcial de areia, quando submetidas a cargas uniaxiais cíclicas e compressões diagonais. Neste trabalho experimental, os autores avaliaram a capacidade de dissipação energética da argamassa, tendo os resultados revelado que a incorporação de quantidades controladas de cortiça na forma granular é vantajosa, em termos da prevenção de danos nos edifícios submetidos a acções sísmicas.

No presente capítulo definem-se as composições das betonilhas leves com ECG e das betonilhas de referência. Estas betonilhas constituem a base de estudo da presente dissertação e cujo desenvolvimento se apresenta nos restantes capítulos.

A definição das betonilhas com ECG estudadas na presente dissertação implicou a realização de um conjunto de trabalhos preliminares que consistiram na caracterização física dos materiais granulares usados (*i.e.* areias e ECG), apresentada na secção 2.2, e na formulação de diversas betonilhas experimentais. A secção 2.3 inclui os resultados de avaliação de massa volúmica e de resistência mecânica, realizados numa série de betonilhas experimentais. Esta secção está organizada em duas partes da seguinte forma: a secção 2.3.1 inclui os resultados do estudo inicial realizado em 42 betonilhas (fabricadas com diversos tipos de agregados) e a secção 2.3.2 apresenta os resultados do estudo de quatro betonilhas resultantes da selecção das anteriores e que contêm 80% de agregados de cortiça expandida e 20% de agregados minerais. O factor que mais contribuiu para o processo de selecção destas betonilhas foi a utilização da maior quantidade possível de resíduos (ECG). Na secção 2.4 apresentam-se as composições das betonilhas com ECG e das betonilhas de referência. As betonilhas leves mantêm, na sua composição, 20% de areia e 80% de agregados de cortiça expandida e contêm dosagens

variáveis de cimento e água. As betonilhas de referência são constituídas apenas por areia e pelas mesmas dosagens de cimento e água. Nesta secção, procede-se à sua caracterização física e mecânica. Na secção 2.5, apresenta-se a síntese do trabalho incluído no capítulo.

2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS

Os agregados usados neste trabalho, para o desenvolvimento das betonilhas, foram areia do rio (ou branca), areia britada (ou areia média e áspera), granulado de cortiça 3/5 (ECG 3/5) e 5/10 (ECG 5/10) e argila expandida 2/4. O recurso a agregados de argila expandida é justificado pelo facto de este tipo de agregados ser habitualmente usado na composição de betonilhas, sobretudo, quando se pretende aligeirar o peso próprio da camada de forma.

Determinaram-se algumas propriedades indispensáveis para a prossecução do trabalho, tais como granulometrias, massa volúmica e baridade das areias, de ECG 3/5 e de ECG 5/10¹⁷. Seguidamente, apresentam-se os resultados dos ensaios da análise granulométrica, massa volúmica e baridade das areias e dos ECG, de acordo com as normas EN 933-1:2012 [56], NP EN 1097-3:2002 [57], NP EN 1097-6:2003 [58], para as areias e normas NP ISO 2030:2011 [59], NP EN 1097-3:2002 [57] e NP EN 1097-6:2003/A1:2010 [58], para os agregados de cortiça expandida. Na Figura 2.1, apresentam-se as curvas granulométricas resultantes do ensaio de peneiração.

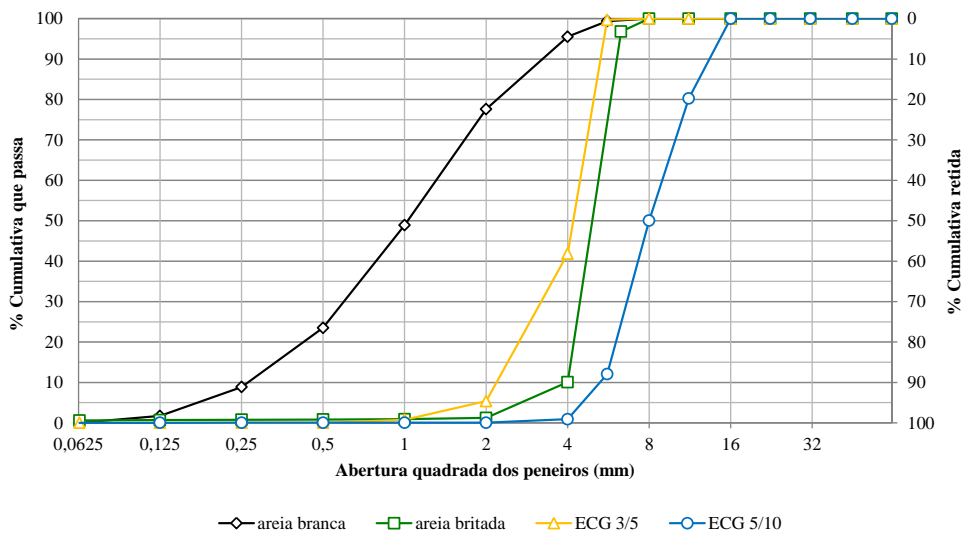


Figura 2.1 - Curvas de análise granulométrica, de acordo com as normas NP EN 933-1:2012 [56] e NP ISO 2030:2011 [59].

¹⁷ Não se procedeu à caracterização física da argila expandida 2/4 por esta estar devidamente documentada nas fichas técnicas dos seus fabricantes.

A Norma NP EN 1097-6:2003/A1:2010 [58] prescreve a determinação da massa volúmica e da absorção de água de agregados minerais, com o recurso a um picnómetro e uma balança (Figura 2.2). No decurso do ensaio, o provete permaneceu num banho de imersão a $T=22^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$, como recomendado na norma. Na Tabela 2.2 apresentam-se os resultados destes ensaios, *i.e.* da massa volúmica do material impermeável das partículas, ρ_a (Mg/m^3)¹⁸, da massa volúmica das partículas secas em estufa, ρ_{rd} (Mg/m^3), da massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca, ρ_{ssd} (Mg/m^3) e da absorção de água (em percentagem de massa seca) após a imersão durante 24 horas, WA_{24} (%). A determinação da massa volúmica das areias seguiu os procedimentos indicados na Norma NP EN 1097-3:2002 [57]. Na mesma tabela (Tabela 2.2) apresentam-se os valores da baridade, ρ_b (Mg/m^3), e da percentagem de vazios, v (%).



Figura 2.2 - Picnómetro e balança electrónica usados para determinar a massa volúmica e absorção de água da areia branca: a) Pesagem do picnómetro com água e agregados; b) Pesagem do picnómetro com água.

Tabela 2.2 – Propriedades físicas das areias.

Tipo de agregado	ρ_a (Mg/m^3)	ρ_{rd} (Mg/m^3)	ρ_{ssd} (Mg/m^3)	WA_{24} (%)	ρ_b (Mg/m^3)	v (%)
Areia branca	2.64	2.64	2.65	0.10	1.62	35.28
Areia britada	2.46	1.96	2.66	10.4	1.51	38.68

A norma NP EN 1097-6:2003/A 1:2010 [58] prescreve a determinação da massa volúmica do material impermeável das partículas do agregado leve, ρ_a (Mg/m^3), a absorção de água como percentagem da massa seca no tempo da medição final, W_F , e a absorção de água como percentagem da massa seca no tempo da medição intermédio, W_I . O procedimento de ensaio prevê a utilização de picnómetros, balanças para a pesagem dos provetes e de redes para evitar a flutuação dos agregados leves (Figura 2.3). O tempo de medição intermédio foi 10

¹⁸ Megagrama por metro cúbico.

minutos, enquanto o tempo de medição final foi 24 horas. Os resultados destes ensaios são apresentados na Tabela 2.3.

A baridade dos ECG foi determinada de acordo com o procedimento definido na norma NP EN 1097-3:2002 [57]. A baridade, ρ_b (Mg/m³), e a percentagem de vazios, v (%), dos ECG usados neste trabalho são apresentados na Tabela 2.3.



Figura 2.3 - Picnômetros usados para determinar a massa volúmica e absorção de água do ECG.

Tabela 2. 3 – Propriedades físicas dos agregados de cortiça expandida.

Tipo de agregado	ρ_a (Mg/m ³)	W_I (%)	W_F (%)	ρ_b (Mg/m ³)	v (%)
ECG 3/5	0.10	85.6	108.0	0.06	44.44
ECG 5/10	0.13	6.9	57.1	0.07	49.68

No gráfico da Figura 2.4 representa-se a absorção de água em percentagem da massa seca, dos ECG 3/5 e ECG 5/10.

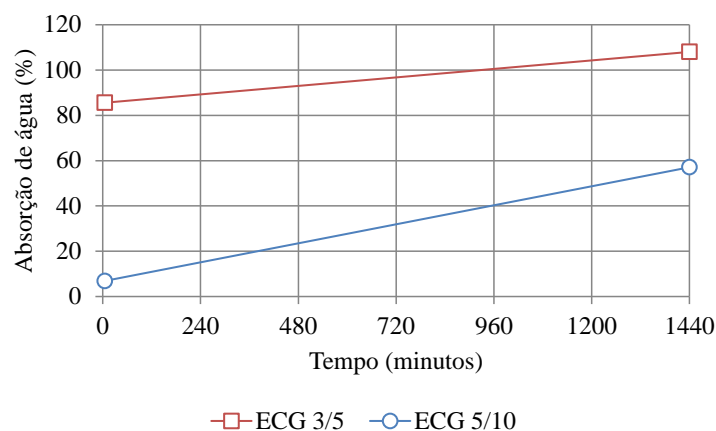


Figura 2.4 - Absorção de água em percentagem de massa seca.

2.3 ESTUDOS DE COMPOSIÇÃO DE MISTURAS CIMENTÍCIAS COM AGREGADOS LEVES

No presente trabalho, começou-se por formular uma série de betonilhas contendo cimento, areia e agregados de cortiça expandida. As referidas betonilhas destinam-se ao enchimento de pavimentos de betão armado, podendo-se-lhes, ainda, sobrepor outros materiais de revestimento, razão pela qual requerem uma consistência seca. Por outro lado, interessa também que estas betonilhas apresentem um desempenho mecânico satisfatório. No mesmo domínio de aplicação, as betonilhas convencionais, *i.e.* fabricadas com areia ou com agregados de argila expandida apresentam desempenho mecânico aceitável. Desta forma, e para comparar os resultados de desempenho mecânico entre os dois tipos de betonilhas, foram também estudadas algumas composições nas quais se usou exclusivamente areia (areia do rio e areia britada) e exclusivamente agregados de argila expandida.

No fabrico das betonilhas, utilizou-se cimento Portland do tipo *CEM II/B-L 32.5 N* e água potável (água da rede de abastecimento público). As misturas experimentais foram realizadas num amassador mecânico (Figura 2.5) e colocadas em provetes prismáticos $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$. (Figura 2.6).



Figura 2.5- Amassador mecânico utilizado para o fabrico das misturas experimentais.

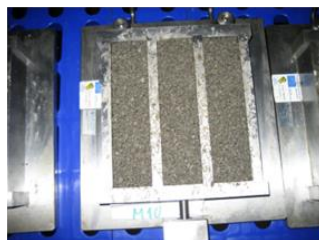


Figura 2.6 - Mistura experimental conformada em molde prismático $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$.

2.3.1 Composições Preliminares

Nesta fase do estudo, fabricaram-se 42 misturas, constituídas por cimento Portland do tipo *CEM II/B-L 32.5N*, areias do rio e britada, agregados de cortiça expandida, de granulometrias 3/5 (ECG 3/5) e 5/10 (ECG 5/10), argila expandida de granulometria 2/4 e água. As referidas misturas foram designadas pela letra «M», seguida de numeração sequencial. As misturas M1 a M23 incluem agregados de cortiça expandida. Adicionalmente, fabricaram-se 12 misturas com agregados minerais, designadamente areia do rio (misturas M30, M31 e M32), areia britada (misturas M33, M34 e M35) e argila expandida (misturas M24, M25, M26, M27, M28 e M29) com o intuito de se estabelecerem valores de referência que permitam balizar o desempenho das betonilhas com agregados de cortiça expandida. Nas Tabelas 2.4 a 2.12, apresentam-se as composições das referidas misturas.

As referidas misturas foram realizadas adicionando os constituintes secos, de acordo com a seguinte ordem: areia, agregados leves e ligante e por último a água. De forma a minimizar os erros nas quantidades das misturas, optou-se por quantificar os materiais constituintes em volume. A cura de cada uma das misturas decorreu numa câmara climática *Walk-In* da marca comercial *Aralab*, modelo *Fitoclima 13800 EDTU*, nas condições $T=23\pm 2^{\circ}\text{C}$, e $\text{HR}=95\pm 5\%$. Os provetes foram desmoldados após 3 dias do fabrico, tendo permanecido durante 28 dias na câmara climatizada.

Tabela 2.4 - Mistura com a 50% de areia do rio e 50% de agregados de cortiça expandida 3/5.

Designação da mistura	Traço volumétrico (C:LA:S)	Cimento (C) (kg/m ³)	Agregado leve (LA)			Areia (S)		Água (l/m ³)
			ECG 3/5 (%)	ECG 5/10 (%)	Argila expandida 2/4 (%)	Areia do rio (%)	Areia britada (%)	
M1	1:1.8:1.8	450.00	50	-	-	50	-	301.50
M4	1:2.5:2.5	252.95	50	-	-	50	-	170.50
M5	1:5:5	114.75	50	-	-	50	-	77.34
M6	1:4.5:4.5	141.57	50	-	-	50	-	95.42
M7	1:4:4	153.72	50	-	-	50	-	103.62
M8	1:3.5:3.5	161.12	50	-	-	50	-	108.60
M9	1:3:3	190.32	50	-	-	50	-	128.28

Tabela 2.5 - Mistura com 100% de agregados de cortiça expandida 3/5.

Designação da mistura	Traço volumétrico (C:LA:S)	Cimento (C) (kg/m ³)	Agregado leve (LA)			Areia (S)		Água (l/m ³)
			ECG 3/5 (%)	ECG 5/10 (%)	Argila expandida 2/4 (%)	Areia do rio (%)	Areia britada (%)	
			M2	1:3.5:0	400.00	100	-	
M3	1:5:0	286.22	100	-	-	-	-	192.92
M10	1:10:0	122.85	100	-	-	-	-	82.81
M11	1:9:0	132.72	100	-	-	-	-	89.46
M12	1:8:0	160.86	100	-	-	-	-	108.42
M13	1:7:0	171.19	100	-	-	-	-	115.39
M14	1:6:0	248.04	100	-	-	-	-	167.19

Tabela 2.6 - Mistura com 50% de areia do rio.

Designação da mistura	Traço volumétrico (C:LA:S)	Cimento (C) (kg/m ³)	Agregado leve (LA)			Areia (S)		Água (l/m ³)
			ECG 3/5 (%)	ECG 5/10 (%)	Argila expandida 2/4 (%)	Areia do rio (%)	Areia britada (%)	
			M15	1:3:3	209.74	-	50	
M18	1:[1.5:1.5]:3	203.56	25	25	-	50	-	137.21

Tabela 2.7 - Mistura sem agregados minerais.

Designação da mistura	Traço volumétrico (C:LA:S)	Cimento (C) (kg/m ³)	Agregado leve (LA)			Areia (S)		Água (l/m ³)
			ECG 3/5 (%)	ECG 5/10 (%)	Argila expandida 2/4 (%)	Areia do rio (%)	Areia britada (%)	
			M16	1:7:0	180.56	-	100	
M17	1:[3.5:3.5]:0	185.30	50	50	-	-	-	124.90

Tabela 2.8 - Mistura com 80% de ECG de granulometria 3/5 e 20% de areia do rio.

Designação da mistura	Traço volumétrico (C:LA:S)	Cimento (C) (kg/m ³)	Agregado leve (LA)			Areia (S)		
			ECG 3/5 (%)	ECG 5/10 (%)	Argila expandida 2/4 (%)	Areia do rio (%)	Areia britada (%)	Água (l/m ³)
M19	1:2.4:0.6	458.16	80	-	-	20	-	308.82
M19-1	1:2.6:0.5	403.48	80	-	-	20	-	271.96
M19-2	1:2.5:0.7	406.03	80	-	-	20	-	273.68
M20	1:3.2:0.8	357.16	80	-	-	20	-	240.74
M21	1:4:1	256.83	80	-	-	20	-	173.12
M22	1:4.8:1.2	205.78	80	-	-	20	-	138.70
M23	1:5.6:1.4	163.83	80	-	-	20	-	110.43

Tabela 2.9 - Mistura com 100% de agregados de argila expandida.

Designação da mistura	Traço volumétrico (C:LA:S)	Cimento (C) (kg/m ³)	Agregado leve (LA)			Areia (S)		
			ECG 3/5 (%)	ECG 5/10 (%)	Argila expandida 2/4 (%)	Areia do rio (%)	Areia britada (%)	Água (l/m ³)
M24	1:3.5:0	306.73	-	-	100	-	-	206.75
M25	1:6:0	170.02	-	-	100	-	-	114.60
M26	1:8:0	130.04	-	-	100	-	-	87.65
M27	1:10:0	105.31	-	-	100	-	-	70.96
M28	1:2:0	505.29	-	-	100	-	-	340.58
M29	1:2.5:0	435.51	-	-	100	-	-	293.55

Tabela 2.10 - Mistura com 80% de ECG de granulometria 3/5 e 20% de areia britada.

Designação da mistura	Traço volumétrico (C:LA:S)	Cimento (kg/m ³)	Agregado leve (LA)			Areia (S)		
			ECG 3/5 (%)	ECG 5/10 (%)	Argila expandida 2/4 (%)	Areia do rio (%)	Areia britada (%)	Água (l/m ³)
M19-AB	1:2.4:0.6	419.05	80	-	-	-	20	282.45
M20-AB	1:3.2:0.8	302.43	80	-	-	-	20	203.85
M21-AB	1:4:1	236.66	80	-	-	-	20	159.52
M22-AB	1:4.8:1.2	183.52	80	-	-	-	20	123.70
M23-AB	1:5.6:1.4	156.56	80	-	-	-	20	105.52

Tabela 2.11 - Mistura com 100% de areia do rio.

Designação da mistura	Traço volumétrico (C:LA:S)	Cimento (C) (kg/m ³)	Agregado leve (LA)			Areia (S)		
			ECG 3/5 (%)	ECG 5/10 (%)	Argila expandida 2/4 (%)	Areia do rio (%)	Areia britada (%)	Água (l/m ³)
M30	1:0:3.5	314.50	-	-	-	100	-	211.98
M31	1:0:4	245.66	-	-	-	100	-	129.61
M32	1:0:5	192.29	-	-	-	100	-	165.58

Tabela 2.12 - Mistura com 100% de areia britada.

Mistura	Traço volumétrico (C:LA:S)	Cimento (C) (kg/m ³)	Agregado leve (LA)			Areia (S)		
			ECG 3/5 (%)	ECG 5/10 (%)	Argila expandida 2/4 (%)	Areia do rio (%)	Areia britada (%)	Água (l/m ³)
M33	1:0:3.5	311.57	-	-	-	-	100	210.01
M34	1:0:4	294.59	-	-	-	-	100	140.22
M35	1:0:5	208.59	-	-	-	-	100	198.56

A avaliação do desempenho das composições formuladas baseou-se na análise dos resultados de resistência mecânica à flexão de três provetes prismáticos e dos resultados do ensaio de compressão dos seis provetes resultantes do ensaio à flexão, de acordo com a norma EN 1015-11:1999/A 1:2006 [60]. Os ensaios de resistência mecânica foram realizados numa máquina universal, da marca comercial *INSTRON*, modelo 5884 (Figura 2.7), com uma célula de carga 10 kN.



Figura 2.7 – Máquina universal.

A massa volúmica aparente, ρ_0 (kg/m³), das argamassas estudadas foi determinada a partir dos valores médios da massa, M (kg), e do volume, V (m³), de três provetes, aos 7 dias de idade, de acordo com a expressão:

$$\rho_0 = \frac{M}{V} \quad (2.1).$$

No gráfico da Figura 2.8, exibem-se os valores das massas volúmicas de cada mistura em função da correspondente dosagem de cimento. Nesta figura, cada marca triangular corresponde a uma amostra e cada cor representa um grupo de amostras que contém a mesma percentagem de agregados, de acordo com os agrupamentos definidos nas Tabelas 2.4 a 2.12, e.g. as misturas M1, M4 a M9, cujas composições se encontram definidas na Tabela 2.4, estão assinaladas a azul e correspondem às amostras fabricadas com 50% de ECG e 50% de areia do rio. Na mesma figura também se representam as linhas de tendência, de cada grupo de amostras, e que permitem visualizar rapidamente a variação da massa volúmica em função da dosagem de cimento.

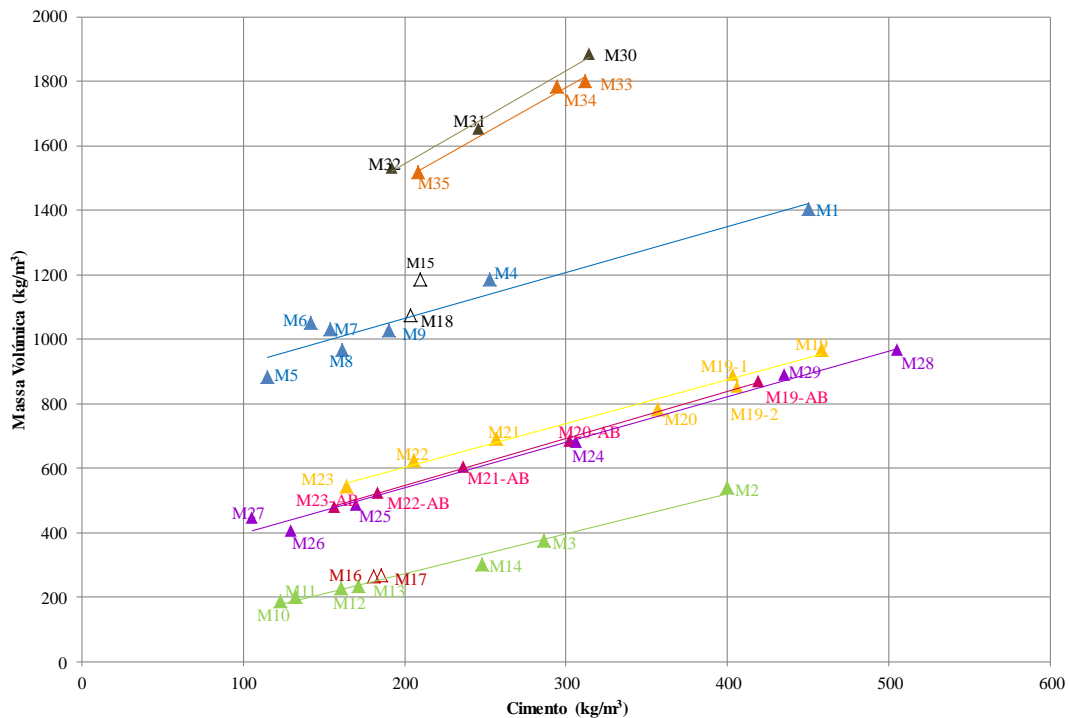


Figura 2.8 - Massa volúmica das argamassas aos 7 dias de idade em função da dosagem de cimento.

A resistência mecânica à flexão, f_{cf} (MPa), (Figura 2.9 a)) foi determinada através da expressão:

$$f_{cf} = \frac{1.5 \times F_f \times l}{d_1 \times d_2^2} \quad (2.2)$$

em que F_f (N) representa a carga máxima aplicada, l (mm) a distância entre os roletes inferiores dos apoios, d_1 e d_2 (mm) as dimensões laterais dos provetes. No caso, dos provetes testados, a expressão (2.2) assume a seguinte forma:

$$f_{cf} = \frac{1.5 \times F_f \times 100}{40 \times 40^2} = 0.00234 F_f \quad (2.3).$$

A resistência mecânica à compressão, f_c (MPa), (Figura 2.9 b)) foi determinada através da expressão:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2.4)$$

em que F corresponde à carga máxima de rotura (N) e A_c (mm^2) à área da secção transversal do provete na qual a força de compressão foi aplicada. Para os provetes ensaiados, a expressão (2.4) assume a seguinte forma:

$$f_c = \frac{F}{40 \times 40} = 0.000625 \times F \quad (2.5).$$

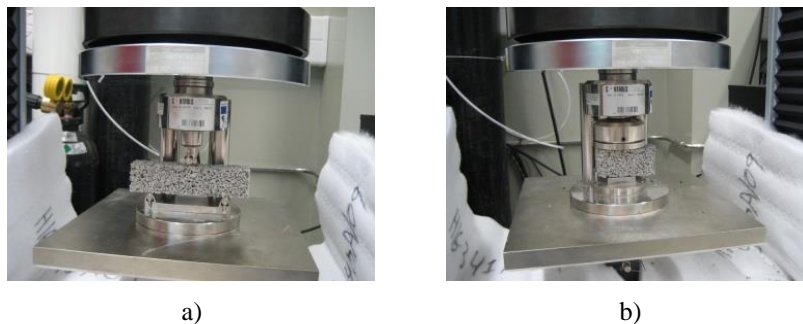


Figura 2.9 - Ensaio de resistência mecânica: a) Resistência à flexão; b) Resistência à compressão.

Os resultados dos ensaios de resistência mecânica, aos 7 e aos 28 dias de idade, à flexão e à compressão, foram transpostos para os gráficos das Figuras 2.10 e 2.11, respectivamente. As marcas circulares e as marcas triangulares representam os provetes com 7 e 28 dias, respectivamente. Os resultados revelam que, à semelhança do que se verifica em betonilhas fabricadas apenas com areia, a resistência mecânica aumenta com o acréscimo da quantidade de

cimento na mistura e com a idade das betonilhas. As composições com agregados minerais, que apresentam as maiores resistências mecânicas à flexão, são M30 (1.89 MPa aos 28 dias), fabricada com 100% de areia do rio e 314.50 kg/m³ de cimento, e M35 (1.99 MPa aos 28 dias), fabricada com 100% de areia britada e 208.59 kg/m³ de cimento. As composições com agregados leves, que apresentam valores mais elevados de resistência mecânica à flexão, são as misturas com agregados de argila expandida, fabricada com 505.29 kg/m³ de cimento, M28 (1.02 MPa aos 28 dias) e M1 (0.89 MPa aos 28 dias) que contém 50% ECG 3/5 e 450 kg/m³ de cimento.

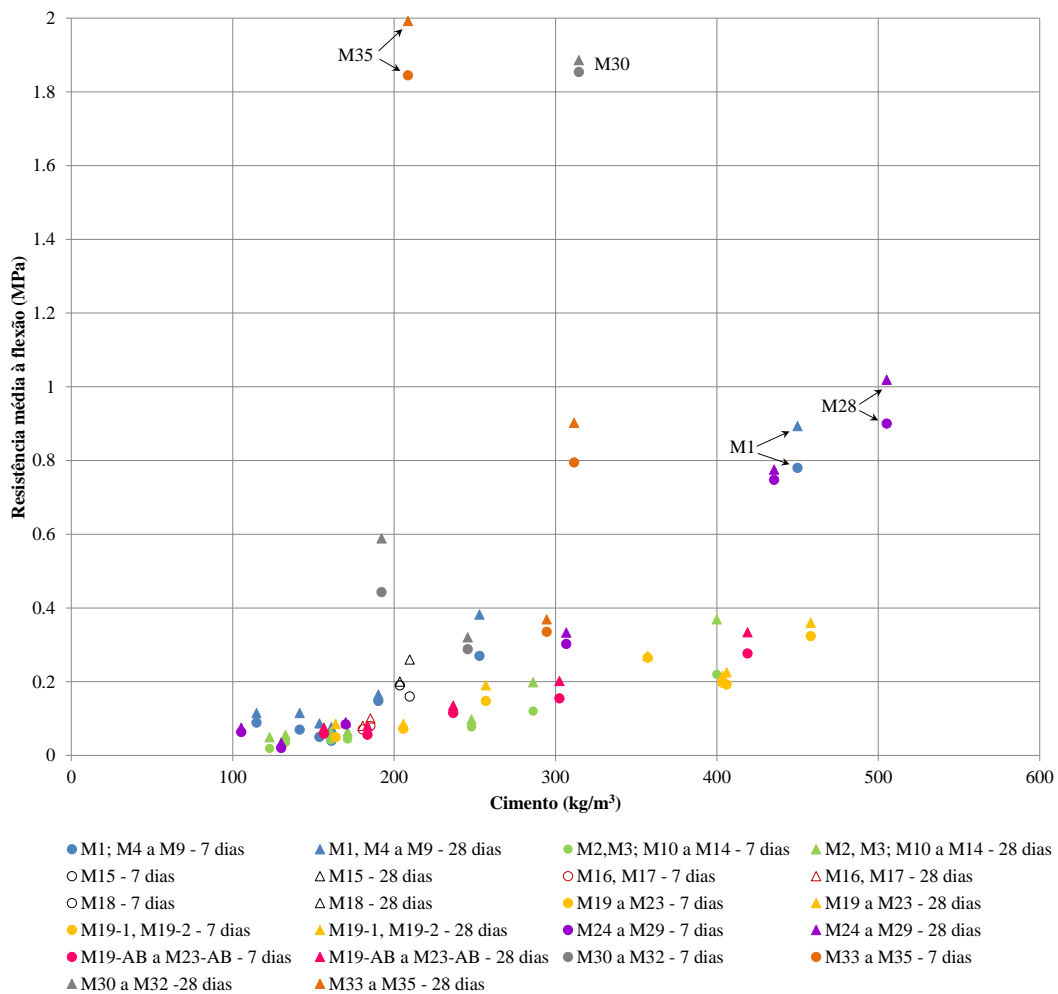


Figura 2.10 - Resistência mecânica média à flexão das misturas experimentais aos 7 e 28 dias de idade.

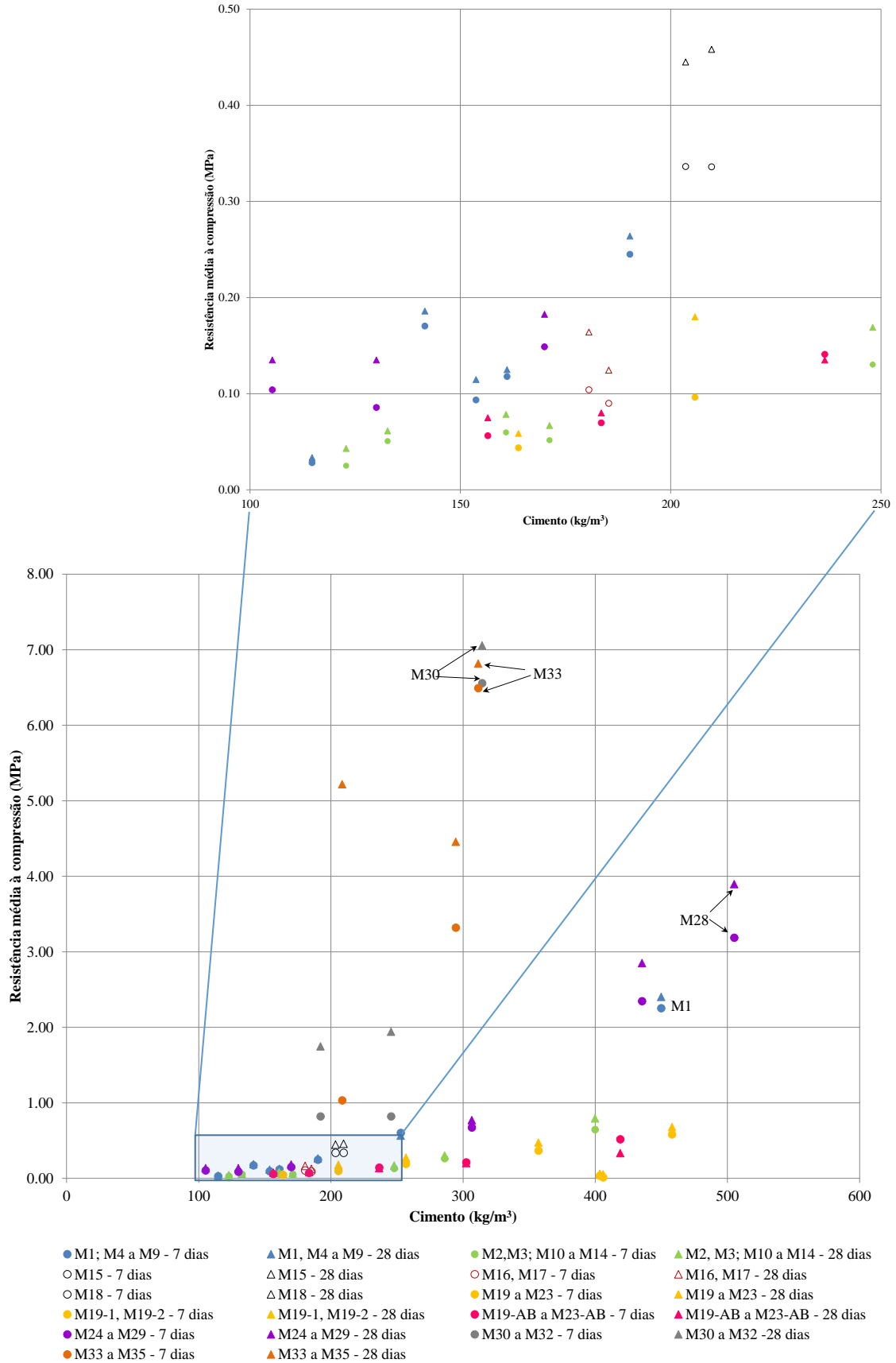


Figura 2.11 - Resistência mecânica média à compressão dos betões experimentais aos 7 e 28 dias de idade.

Os resultados dos ensaios de resistência mecânica à compressão revelam que M30 (7.06 MPa aos 28 dias), fabricada com 100% de areia do rio e 314.50 kg/m³ de cimento, e M33 (6.82 MPa aos 28 dias), fabricada com 100% de areia britada e 311.57 kg/m³ de cimento, são as misturas que apresentam a maior resistência mecânica. Nas misturas com agregados leves, M1 (2.40 MPa), fabricada com ECG 3/5, e M28 (3.90 MPa aos 28 dias), que contém argila expandida de granulometria 2/4, são as betonilhas que exibem os maiores valores de resistência mecânica à compressão.

Ainda que os ensaios realizados revelem ser a composição M1, a mistura constituída por 50% de agregados de cortiça expandida 3/5, 50% de areia do rio e 450 kg/m³ de cimento, a que apresenta o comportamento mais próximo da betonilha fabricada com agregados de argila expandida 2/4 e 505.29 kg/m³ de cimento, proceder-se-á, na secção seguinte, à avaliação do desempenho das betonilhas que incorporam 80% de ECG e 20% de areia. Pretende-se, assim, utilizar a maior quantidade possível de resíduos, *i.e.* ECG, num elemento construtivo não estrutural e avaliar o seu desempenho mecânico. Interessa também referir que, tendo-se verificado uma certa desagregação dos provetes prismáticos, após a sua desmoldagem e mesmo na fase endurecida, sobretudo nas misturas com as menores dosagens de cimento, o trabalho prosseguiu com a realização de ensaios de resistência mecânica usando provetes cúbicos de maiores dimensões, *i.e.* 0.15×0.15×0.15 m³, para além dos provetes prismáticos com 40×40×160 mm³.

2.3.2 Composições Cimentícias com 80% de Agregados Leves de Cortiça Expandida e 20% de Areia

Na presente secção, o trabalho centra-se no estudo do desempenho mecânico das misturas M22 e M23 (assim designadas na secção anterior). Nesta fase, utilizou-se areia do rio (AR) e areia britada (AB) no seu fabrico, resultando, assim, as designações M22-AR, M23-AR, M22-AB e M23-AB. As argamassas foram, agora, preparadas numa betoneira de pás rotativas, utilizando as mesmas proporções dos constituintes anteriormente definidas.

Durante a amassadura, verificou-se a formação de grumos, do tamanho de nozes, nas misturas com areia britada, *i.e.* M22-AB e M23-AB (imagens da Figura 2.12). Constatou-se, igualmente, que à medida que se aumentava o tempo de amassadura, os referidos grumos aumentavam de tamanho. Dado que se pretendia garantir a obtenção de pastas homogéneas, testaram-se vários tempos de amassadura, tendo-se concluído que, para a capacidade da betoneira usada (100 l), o tempo de mistura satisfatório seria 10 minutos.

A ordem de colocação dos componentes no interior da betoneira foi a seguinte: areia, agregado leve e cimento. Os agregados e o ligante foram misturados a seco dentro da betoneira e depois foi introduzida a água. Os componentes foram amassados durante 10 minutos.

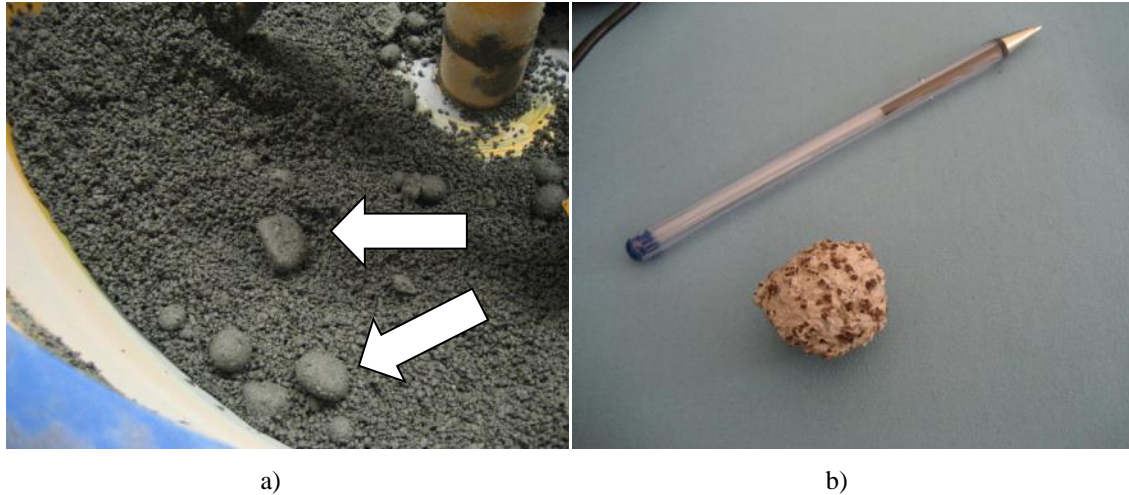


Figura 2.12 - Formação de grumos nas misturas com areia britada: a) Mistura no interior da betoneira; b) Aspecto de grumo, decorridos 7 dias após o fabrico da mistura.

As composições destas misturas, por metro cúbico de argamassa, são apresentadas na Tabela 2.13. Moldaram-se provetes prismáticos, $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, e cúbicos, $0.15 \times 0.15 \times 0.15 \text{ m}^3$, que foram condicionados a $T=23 \pm 2^\circ\text{C}$ e $HR=95 \pm 5\%$, numa câmara climática *Walk-In*, da marca comercial *Aralab*, modelo *Fitoclima 13800 EDTU*, durante 28 dias.

Tabela 2.13- Composição das argamassas com agregados leves de cortiça e areia do rio, AR, e britada, AB.

Designação da mistura	Traço volumétrico	Cimento (kg/m^3)	Agregado leve ECG 3/5 (kg/m^3)	Areia (kg/m^3)	Água (l/m^3)
M22-AR	1:4.8:1.2	205.779	50.652	347.599	144.922
M23-AR	1:5.6:1.4	163.830	42.545	322.862	91.495
M22-AB	1:4.8:1.2	183.523	40.851	298.070	102.493
M23-AB	1:5.6:1.4	156.556	40.656	296.650	87.433

Os ensaios de resistência mecânica foram realizados numa máquina universal, da marca comercial *INSTRON* modelo 5884 (Figura 2.7), com uma célula de carga de 30 kN.

2.3.2.1 Massa Volúmica

A massa volúmica das misturas, aos 7 e aos 28 dias de idade, em função da correspondente dosagem de cimento, foi transposta para os gráficos das Figuras 2.13 e 2.14. Os resultados apresentados foram determinados a partir de três provetes prismáticos (Figura 2.13) e três provetes cúbicos (Figura 2.14), de acordo com a expressão (2.1).

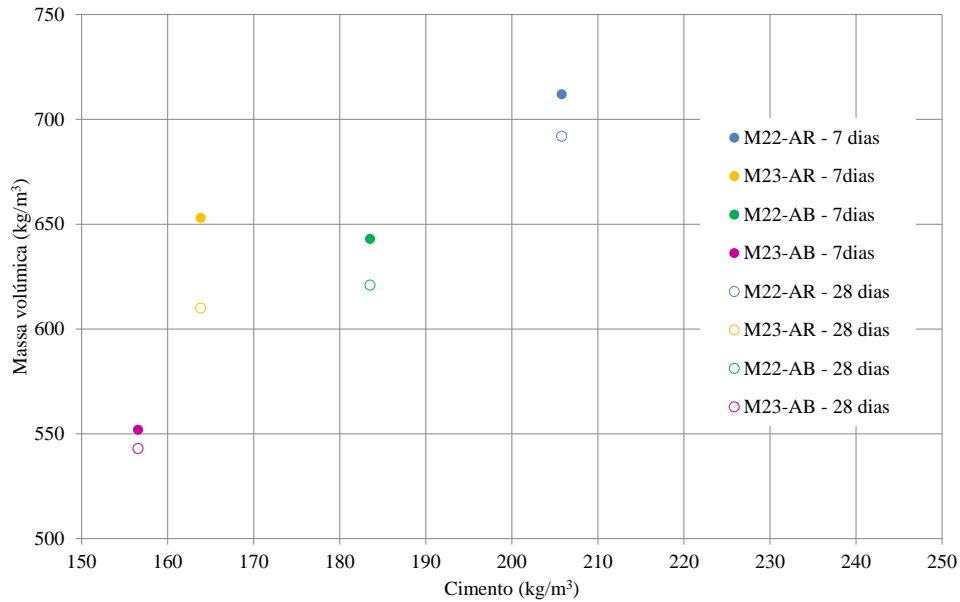


Figura 2.13 - Massa volúmica (em função da quantidade de cimento) determinada nos provetes prismáticos, aos 7 e aos 28 dias de idade.

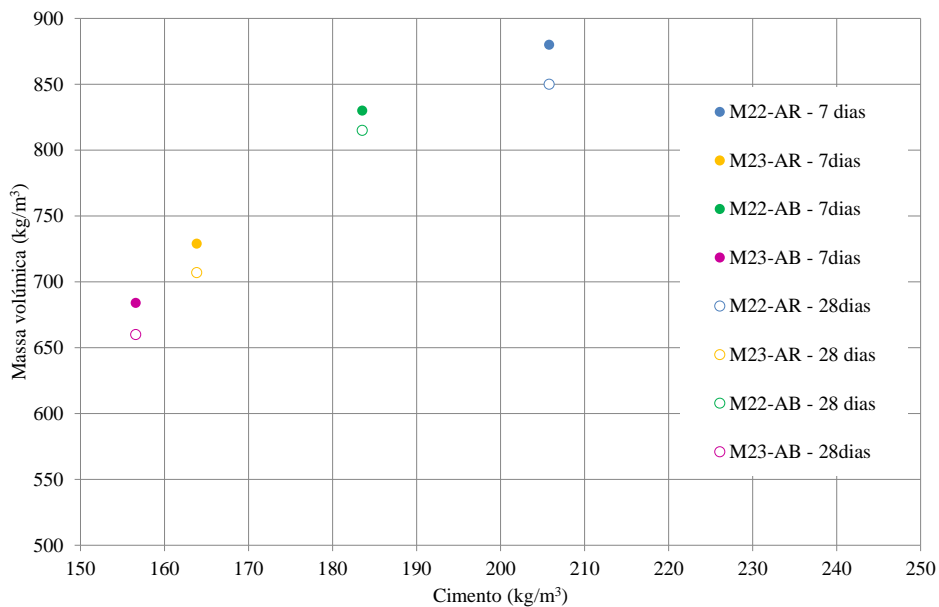


Figura 2.14 - Massa volúmica (em função da quantidade de cimento) determinada nos provetes cúbicos, aos 7 e aos 28 dias de idade.

2.3.2.2 Resistência Mecânica à Flexão

A resistência mecânica à flexão foi determinada através da expressão (2.3). Na Figura 2.15, apresentam-se os resultados da resistência mecânica à flexão, em função da dosagem de cimento. Os referidos resultados correspondem à média dos valores de três provetes, para cada mistura.

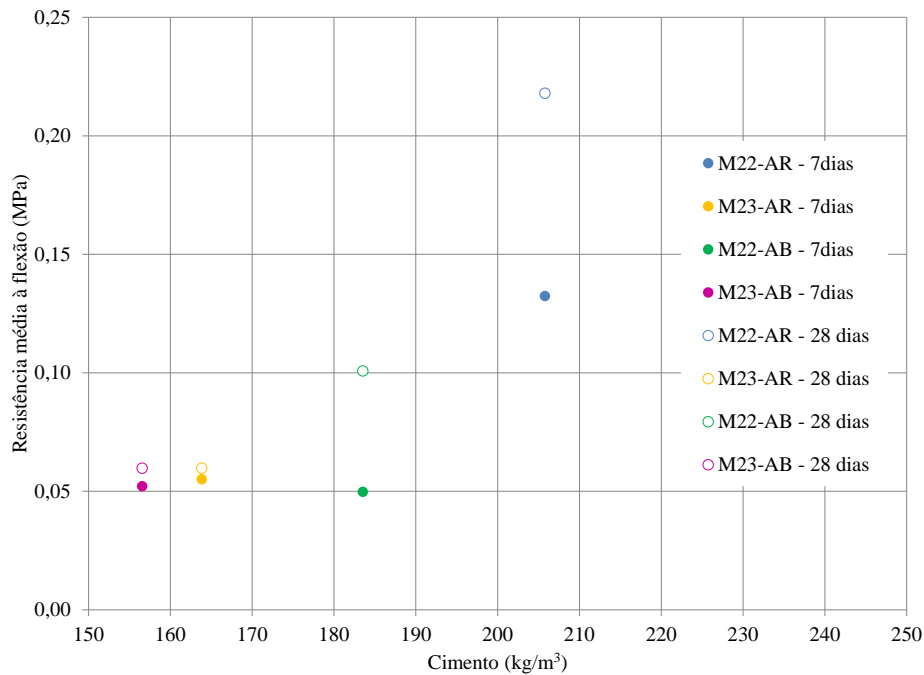


Figura 2.15 - Resistência mecânica à flexão dos provetes prismáticos aos 7 e aos 28 dias de idade.

2.3.2.3 Resistência Mecânica à Compressão

Realizaram-se ensaios de compressão com os seis provetes resultantes do ensaio de flexão e ensaios de compressão com três provetes cúbicos de maiores dimensões. Nos gráficos das Figuras 2.16 e 2.17, podem observar-se os valores médios da resistência mecânica à compressão em prismas e em cubos, respectivamente, em função da dosagem de cimento. A resistência mecânica à compressão foi determinada através da expressão (2.4).

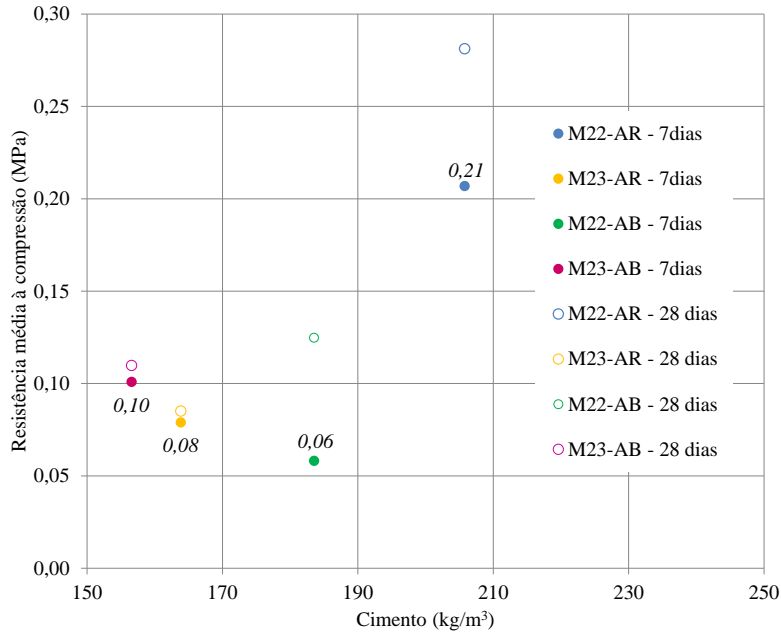


Figura 2.16 - Resistência mecânica à compressão provetes prismáticos, aos 7 e aos 28 dias de idade.

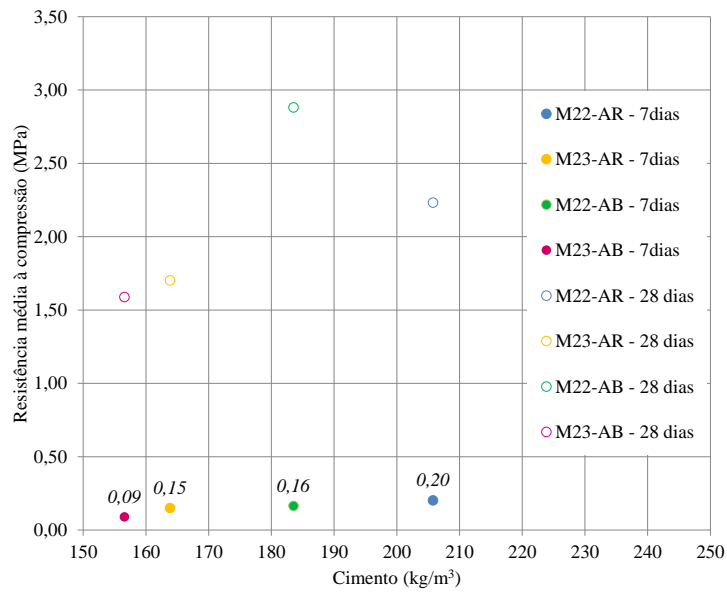


Figura 2.17 - Resistência mecânica à compressão dos provetes cúbicos, aos 7 e aos 28 dias de idade.

2.3.2.4 Análise de Resultados

A análise de resultados revela que a massa volúmica determinada a partir dos provetes cúbicos é superior à determinada através dos provetes prismáticos, tal como era expectável, dado que os provetes prismáticos têm menores dimensões. Estes resultados são congruentes

com os valores de baridade das areias, apresentados na Tabela 2.2. As misturas fabricadas com areia britada apresentam valores de massa volúmica inferiores às das correspondentes misturas fabricadas com areia do rio. Nos provetes prismáticos, os valores mais elevados de massa volúmica, aos 7 e aos 28 dias de idade, correspondem a M22-AR, com 712 kg/m^3 e 692 kg/m^3 , respectivamente, enquanto os menores valores correspondem a M23-AB, com 552 kg/m^3 e 543 kg/m^3 , respectivamente. Nos provetes cúbicos, M22-AR regista os maiores valores de massa volúmica, ou seja, 880 kg/m^3 e 850 kg/m^3 , respectivamente, aos 7 e aos 28 dias, enquanto os menores valores correspondem a M23-AB com 684 kg/m^3 e 660 kg/m^3 aos 7 e 28 dias, respectivamente.

Os resultados dos ensaios de resistência à flexão apresentados revelam que a resistência mecânica à flexão aumenta com a idade dos provetes. As maiores resistências mecânicas, aos 7 e aos 28 dias de idade, correspondem a M22-AR, *i.e.* $f_{cf}=0.1324 \text{ MPa}$ e $f_{cf}=0.2180 \text{ MPa}$, respectivamente. O menor valor de resistência mecânica aos 7 dias regista-se na mistura M22-AB, com $f_{cf}=0.1324 \text{ MPa}$, enquanto aos 28 dias de idade, M23-AB e M23-AR registam os menores valores, *i.e.* $f_{cf}=0.0598 \text{ MPa}$. O maior acréscimo de resistência mecânica à flexão com a idade, $\Delta f_{cf}=0.0856 \text{ MPa}$, corresponde a M22-AR e o menor, $\Delta f_{cf}=0.0047 \text{ MPa}$, a M23-AR.

A resistência mecânica à compressão aumenta com a idade, como demonstram os resultados apresentados nos gráficos das Figuras 2.16 e 2.17. Através da comparação dos resultados dos ensaios entre os dois tipos de provetes, depreende-se que dos provetes de menores dimensões resultam menores resistências mecânicas, verificando-se as maiores diferenças entre os provetes de 28 dias de idade. Desta forma, o ensaio de compressão com os provetes de menores dimensões revela que, aos 7 e aos 28 dias de idade, M22-AR regista os maiores valores de resistência mecânica, *i.e.* $f_c=0.2069 \text{ MPa}$ e $f_c=0.2813 \text{ MPa}$, respectivamente. Os menores valores de resistência mecânica correspondem a M22-AB e M23-AR, aos 7 e aos 28 dias, respectivamente, *i.e.* $f_c=0.0581 \text{ MPa}$ e $f_c=0.0851 \text{ MPa}$. As misturas M22-AR e M23-AR registam o maior e o menor acréscimo de resistência mecânica entre os 7 e os 28 dias, *i.e.* $\Delta f_c=0.0744 \text{ MPa}$ e $\Delta f_c=0.0061 \text{ MPa}$, respectivamente. Nos ensaios de compressão com os provetes de maiores dimensões, M22-AR revela a maior resistência mecânica aos 7 dias de idade, com $f_c=0.2023 \text{ MPa}$, enquanto a menor resistência mecânica, $f_c=0.0900 \text{ MPa}$, corresponde a M23-AB. Aos 28 dias de idade, M22-AB regista a maior resistência mecânica à compressão, *i.e.* $f_c=2.8810 \text{ MPa}$, enquanto o menor valor, $f_c=1.5885 \text{ MPa}$, corresponde a M23-AB. Nos provetes de maiores dimensões, o maior acréscimo de resistência mecânica com a idade, $\Delta f_c=2.7163 \text{ MPa}$, corresponde a M22-AB e o menor, $\Delta f_c=1.4985 \text{ MPa}$, a M23-AB.

As imagens da Figura 2.18 registam as superfícies de rotura, em duas faces adjacentes, num provete cúbico após o ensaio de compressão. Estas superfícies de rotura são características nos materiais compósitos de base cimentícia com reduzida quantidade de cimento.

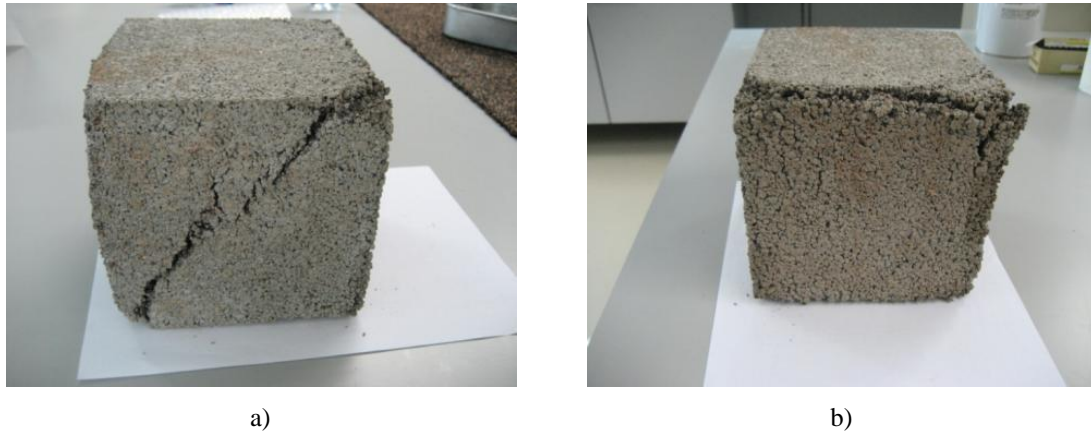


Figura 2.18 - Superfícies de rotura em duas faces adjacentes de um provete cúbico M23-AR, resultantes do ensaio de resistência mecânica à compressão.

A partir da análise dos resultados destes ensaios, depreende-se que os provetes prismáticos, por serem de pequenas dimensões, não contêm massa suficiente que garanta a representatividade das amostras estudadas, quer para a determinação das suas massas volúmicas, quer para a quantificação da sua resistência mecânica. Os resultados revelam, ainda, que as misturas com areia britada, M22-AB e M23-AB, são as que apresentam os menores valores de massa volúmica, contribuindo, assim, para reduzir o peso próprio das betonilhas leves que se pretendem formular. No entanto, nestas mesmas misturas também se verificou a formação de grumos, sobretudo, para tempos de amassadura longos, tal como foi descrito. Os referidos grumos deram lugar a torrões, na fase endurecida das misturas (Figura 2. 12 b)), com reduzida resistência mecânica (*e.g.* na mistura com a menor quantidade de cimento, M23-AB, os torrões desfaziam-se facilmente por compressão entre as mãos). Desta forma, a formação destes grumos será indesejável, pois a sua presença terá como consequência a redução da resistência mecânica das betonilhas.

Face a estas constatações, optou-se por prosseguir o trabalho, mantendo a substituição de 80% de areia por ECG, usando areia do rio (excluindo-se, assim, a formação de grumos durante o processo de amassadura) e realizando os ensaios de compressão com provetes $0.15 \times 0.15 \times 0.15 \text{ m}^3$.

2.4 COMPOSIÇÃO E FABRICO DE BETONILHAS COM AGREGADOS DE CORTIÇA EXPANDIDA DESTINADAS AO ENCHIMENTO DE LAJES DE PAVIMENTO

Mediante os resultados do estudo preliminar descrito na secção 2.4, desenvolveram-se três composições de betonilhas com ECG e dosagens distintas de cimento: 150 (M150), 250

(M250) e 400 kg/m^3 (M400)¹⁹. Foram, igualmente, produzidas betonilhas constituídas por cimento, areia e água com as mesmas dosagens de cimento, *i. e.* 150, 250 e 400 kg/m^3 , a que se designaram betonilhas de referência (R150, R250 e R400, respectivamente). Todas as betonilhas foram fabricadas com cimento Portland *CEM II/B-L 32.5 N*. As betonilhas com agregados de cortiça contêm ligante, areia do rio e ECG de granulometrias 3/5 e 5/10 cuja caracterização física se apresentou na secção 2.3. Estas betonilhas foram formuladas para que na sua composição existam 50% de ECG de granulometria 3/5 e 50% de granulometria 5/10, substituindo 80% de areia. As betonilhas de referência são constituídas por ligante, areia do rio e água.

Partindo das quantidades previamente estabelecidas de cimento Portland, ajustaram-se experimentalmente, as quantidades dos constituintes sólidos, *i.e.* areia, ECG e água, de forma a obter pastas de consistência seca. A consistência das betonilhas foi avaliada através do ensaio na mesa de espalhamento, de acordo com a norma EN 1015-3:1999 [61]. A consistência da argamassa traduz a sua fluidez, ou seja, permite avaliar a deformabilidade da argamassa no estado fresco quando esta é submetida a uma determinada força. De acordo com Powers [62], a trabalhabilidade de uma pasta de cimento Portland depende da sua consistência, da granulometria dos agregados e da relação água-cimento (a/c), sendo a trabalhabilidade um conceito empírico associado à aptidão da pasta fresca para ser transportada, colocada, compactada e receber acabamento sem sofrer segregação ou exsudação.

Os ensaios de resistência mecânica foram realizados em provetes cúbicos $0.15 \times 0.15 \times 0.15 \text{ m}^3$ previamente condicionados numa câmara climática, da marca comercial *Aralab*, modelo *Fitoclíma* 13800 EDTU, nas condições $T=23 \pm 2^\circ\text{C}$ e $HR=95 \pm 5\%$.

Nas secções seguintes, descrevem-se as composições e o processo de fabrico, e apresentam-se os resultados das massas volúmicas e de resistência mecânica à compressão, de provetes cúbicos normalizados.

2.4.1 Composição e Fabrico das Betonilhas

Na Tabela 2.14, apresentam-se as composições das betonilhas fabricadas com cimento, areia, ECG e água (M150, M250 e M400) e das betonilhas fabricadas com cimento, areia e água (R150, R250 e R400). Na Tabela 2.15 indicam-se os traços volumétricos e a relação a/c de cada betonilha.

Os componentes das betonilhas foram misturados numa betoneira de pás. O fabrico das betonilhas com ECG (M150, M250 e M400) processou-se da seguinte forma: os agregados de

¹⁹As betonilhas M150 e M250 apresentam, respectivamente, menos 62.5 e 37.5% de cimento do que a betonilha M400.

cortiça foram misturados durante cerca de 1 minuto. Findo este tempo, adicionou-se a areia e o cimento e procedeu-se a nova mistura durante 3 minutos. A água foi adicionada em 2 fases: após a adição da primeira parte de água seguiram-se 3 minutos de mistura e após a adição da restante água, os constituintes foram agregados por mais 3 minutos de mistura, totalizando 10 minutos de amassadura.

Tabela 2.14 - Composição, por metro cúbico, das betonilhas.

Designação da betonilha	Cimento (C) (kg/m ³)	Areia (S) (kg/m ³)	ECG 3/5 (kg/m ³)	ECG 5/10 (kg/m ³)	Água (l/m ³)
M150	151.09	377.67	27.89	32.54	81.36
M250	254.63	358.25	25.54	29.79	138.80
M400	400.02	339.84	26.96	31.46	202.22
R150	156.96	1487.99	-	-	105.39
R250	253.98	1302.16	-	-	119.82
R400	401.01	1448.15	-	-	178.26

Tabela 2.15 – Traço em volume e relação água-ligante (a/c) das betonilhas.

Designação da betonilha	Traço volumétrico	
	C:[ECG3/5:ECG5/10]:S	a/c
M150	1.0:[3.7:3.7]:1.8	0.64
M250	1.0:[2.0:2.0]:1.0	0.65
M400	1.0:[1.3:1.3]:0.6	0.60
R150	1.0:[0:0]:7.0	0.80
R250	1.0:[0:0]:3.8	0.56
R400	1.0:[0:0]:2.7	0.53

2.4.2 Massa Volúmica e Resistência Mecânica

Na secção 2.4.2.1 apresentam-se as massas volúmicas das betonilhas, aos 7, 28, 56 e 84 dias de idade. A avaliação da resistência mecânica, realizadas aos 7, 28, 56 e 84 dias de idade é apresentada na secção 2.4.2.2.

2.4.2.1 Massa Volúmica Aparente

As massas volúmicas aparentes das betonilhas foram determinadas, considerando a massa e o volume de provetes cúbico, de acordo com a expressão (2.1), indicando-se os valores médios de três provetes, em cada idade, na Tabela 2.16. A redução das massas volúmicas, em termos percentuais, é apresentada no gráfico da Figura 2.19.

Tabela 2.16 - Massas volúmicas das betonilhas.

Designação das betonilhas	Massa volúmica (kg/m ³)			
	7 dias	28 dias	56 dias	84 dias
M150	610	520	480	470
M250	780	740	720	680
M400	960	900	860	820
R150	1700	1600	1460	1440
R250	1640	1580	1560	1510
R400	2010	1970	1940	1890

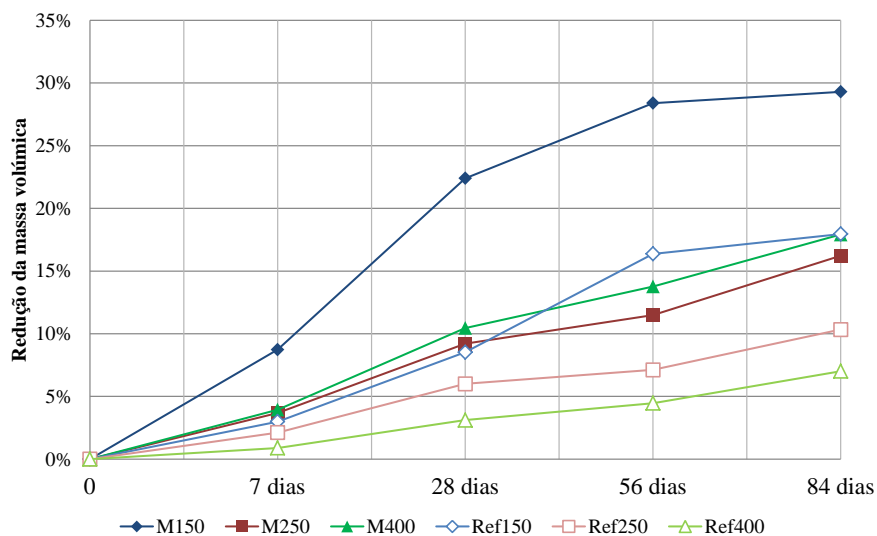


Figura 2.19 - Redução percentual da massa volúmica de todas as betonilhas ao longo de 84 dias.

A análise da evolução das massas volúmicas das betonilhas revela que a maior redução de massa volúmica, ao longo de 84 dias, ocorre nas betonilhas com agregados de cortiça. Ao longo dos 84 dias, a betonilha M150 mostra uma redução da massa volúmica de 29%, enquanto a betonilha R150 apresenta uma redução de 18%. As betonilhas M250 e R250 manifestam diminuições da massa volúmica de 16 e 10%, respectivamente. As reduções das massas volúmicas das betonilhas com maior teor de cimento, M400 e R400, são 18 e 7%, respectivamente.

Os agregados de cortiça apresentam valores de absorção de água, W_F , substancialmente superiores ao da areia, WA_{24} , conforme se atesta através dos resultados dos ensaios de avaliação de massa volúmica e de absorção de água após imersão durante 24 horas, apresentados nas Tabelas 2.2 e 2.3, o que permite compreender a maior diminuição da massa volúmica das betonilhas com agregados de cortiça, ao longo dos 84 dias.

2.4.2.2 Ensaios de Resistência Mecânica à Compressão

Os resultados dos ensaios de resistência mecânica, realizados de acordo com a norma NP EN 12390-3:2011 [63], foram transpostos para o gráfico da Figura 2.20. Os valores representados traduzem os resultados médios do ensaio de três provetes para cada idade da amostra. Os ensaios foram realizados na máquina universal descrita na secção 2.4 (Figura 2.7), com uma célula de carga de 30 kN. No gráfico da Figura 2.20, representa-se a evolução da resistência mecânica à compressão das betonilhas, para cada idade de maturação.

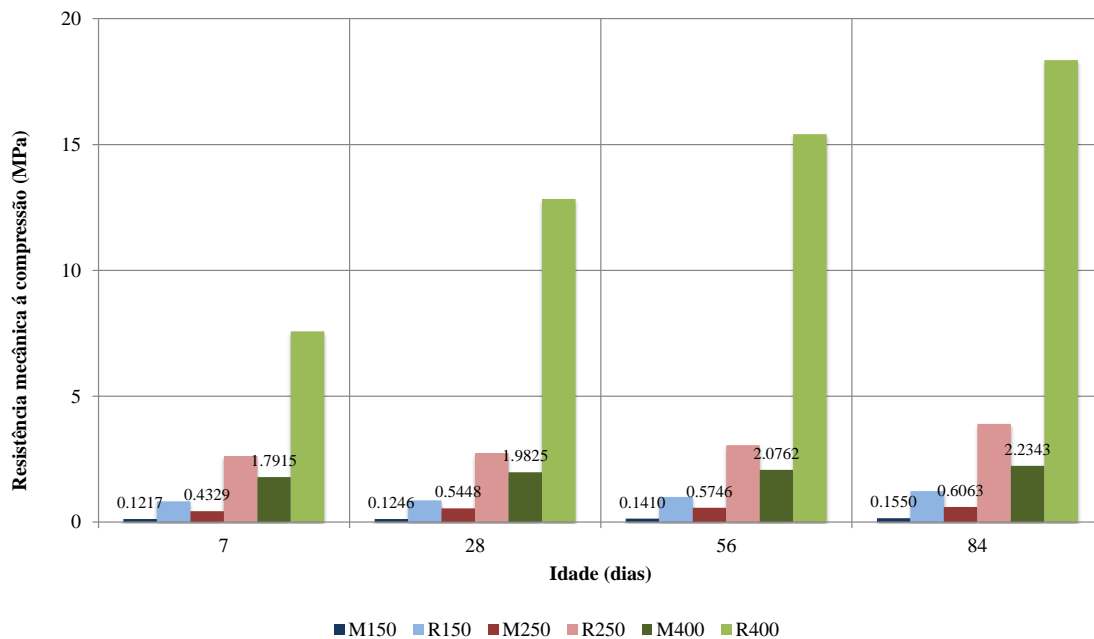


Figura 2.20 - Resistência mecânica à compressão das betonilhas, com a idade.

Os resultados dos ensaios de resistência mecânica à compressão demonstram, tal como era expectável, que a resistência mecânica aumenta com a quantidade de cimento Portland e com a idade das betonilhas. Desta forma, os menores valores registam-se aos 7 dias de idade (0.12, 0.43 e 1.79 MPa para as betonilhas M150, M250 e M400, respectivamente), enquanto os maiores valores se verificam para a idade de 84 dias (0.15, 0.61 e 2.23 MPa para as betonilhas M150, M250 e M400, respectivamente). A análise dos resultados dos ensaios de resistência mecânica à compressão, nas betonilhas de referência, R150, R250 e R400, revela, tal como

observado nas betonilhas leves, que a resistência mecânica aumenta com a quantidade de cimento Portland. A resistência mecânica das betonilhas de referência, R150, R250 e R400, regista valores crescentes ao longo dos 84 dias.

No caso das betonilhas leves verifica-se, tal como seria de esperar que, à medida que a massa volúmica diminui, devido aos fenómenos químicos decorrentes do processo de endurecimento das pastas de cimento, aumenta a sua resistência mecânica (Figura 2.21).

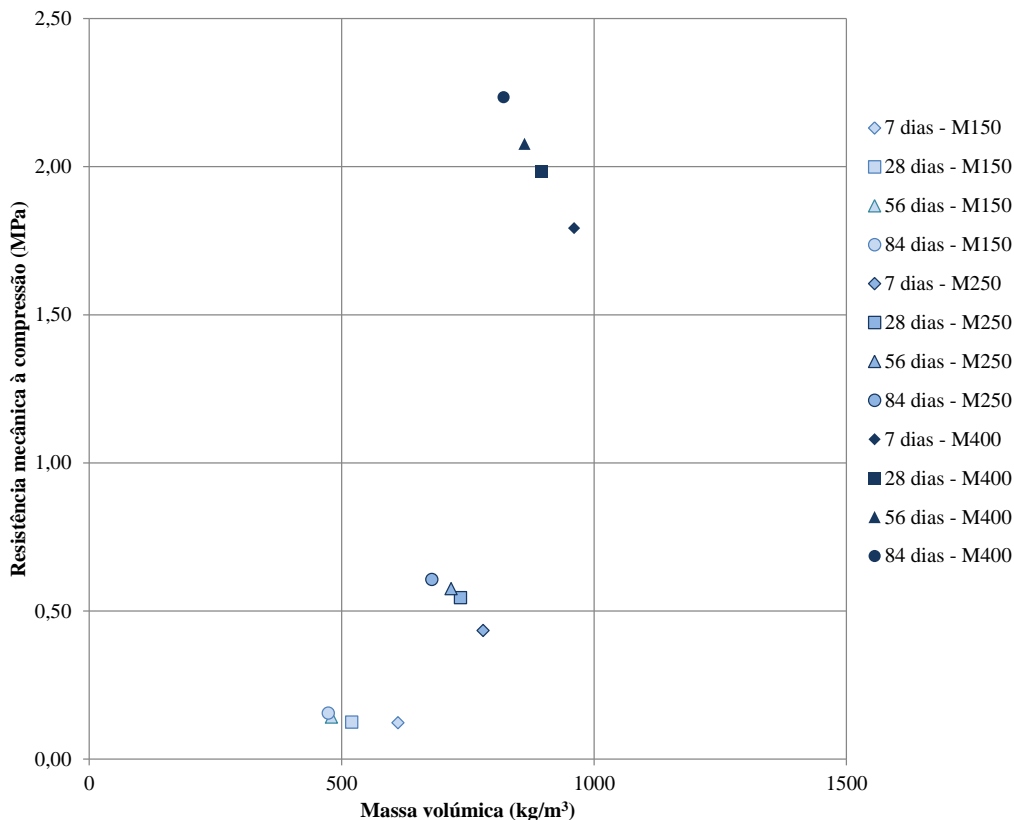


Figura 2.21 - Resistência mecânica à compressão (MPa) vs. massa volúmica (kg/m³).

Da análise comparativa dos valores de resistência mecânica das betonilhas de referência e das betonilhas com agregados de cortiça expandida, ao longo dos 84 dias, constata-se que as primeiras apresentam os maiores valores de resistência mecânica à compressão. Assim sendo, é possível afirmar que a substituição de 80% de areia por agregados de cortiça expandida na composição das betonilhas leves se reflecte no desempenho mecânico da seguinte forma:

- Existe uma redução média da resistência mecânica à compressão de 86%, da betonilha leve M150, relativamente à correspondente betonilha de referência, R150;
- A betonilha leve M250 regista uma redução média da resistência mecânica de 82%, relativamente à betonilha de referência, R250;

- A redução de resistência mecânica média da betonilha leve fabricada com 400 kg/m^3 de cimento Portland, M400, é de 84% quando comparada com a da correspondente betonilha de referência, R400.

Os resultados obtidos permitem afirmar que a substituição de areia por ECG provoca uma redução significativa na resistência mecânica à compressão das betonilhas estudadas. Os trabalhos de Azziz [51], Costa [53] e de Panesar e Shindman [54] revelam conclusões semelhantes, ainda que os referidos estudos tenham incidido sobre argamassas e betões estruturais e nos quais foram usados outros tipos de cortiça (*e.g.* cortiça natural, granulometrias e proporções de cortiça distintas das usadas neste trabalho).

2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo procedeu-se à caracterização física dos agregados minerais e dos agregados de cortiça expandida usados na composição das misturas formuladas para a definição da composição de betonilhas leves, com a incorporação de granulados de cortiça expandida (ECG). Determinaram-se as curvas granulométricas, as massas volúmicas, as baridades e absorção de água das areias e dos ECG. Estes agregados foram usados, juntamente com cimento e água, na composição de 42 misturas que foram avaliadas relativamente à sua resistência mecânica, à flexão e à compressão, em provetes prismáticos, aos 7 e aos 28 dias de idade. A análise dos resultados permitiu concluir, em comparação com o desempenho mecânico de betonilhas fabricadas com agregados minerais convencionais, mas, sobretudo, com agregados de argila expandida que aliviam igualmente o peso próprio da camada de enchimento, que a composição constituída por areia do rio e ECG 3/5, na proporção 50-50%, e 450 kg/m^3 de cimento, apresenta resultados satisfatórios, *i.e.* similares aos da betonilha com agregados de argila expandida. Não obstante os resultados obtidos, prosseguiu-se o estudo, com o desenvolvimento de misturas constituídas por 80% de ECG e 20% de areia, do rio e britada, de modo a utilizar uma maior quantidade de ECG. O estudo seguinte focalizou-se, assim, no conjunto de quatro misturas, *i.e.* M22-AB, M22-AR, M23-AB e M23-AR, constituídas por cimento Portland do tipo *CEM II/B-L 32.5 N*, 80% de ECG de granulometria 3/5, por 20% de areia do rio (AR) e areia britada (AB), em traços volumétricos 1:4.8:1.2 e 1:5.6:1.4 (cimento : agregados de cortiça 3/5 : areia). Nesta fase do trabalho, as misturas foram condicionadas em câmara climática, durante o período de cura, a $T=23\pm 2^\circ\text{C}$ e $HR=95\pm 5\%$, tendo-se monitorizado as suas massas volúmicas e avaliado o seu desempenho mecânico, designadamente as resistências à flexão e à compressão de provetes prismáticos e à compressão de provetes cúbicos, aos 7 e aos 28 dias de idade. A análise dos resultados permitiu definir, na

fase subsequente do estudo, o tipo de ensaios de resistência mecânica e o agregado mineral mais adequado para o fabrico das betonilhas.

Na secção 2.4, apresentaram-se as composições das betonilhas leves constituídas por cimento, agregados de cortiça expandida, areia do rio e água e as composições das betonilhas de referência constituídas por cimento, areia do rio e água. No fabrico das betonilhas leves, recorreu-se a cimento Portland *CEM II/B-L 32.5 N*, nas dosagens de 150, 250 e 400 kg/m³, ECG de granulometrias 3/5 e 5/10 na proporção volumétrica 50-50%, areia do rio e água. As betonilhas de referência são constituídas por cimento Portland *CEM II/B-L 32.5 N*, nas mesmas dosagens das betonilhas leves, areia do rio e água. As betonilhas leves e as betonilhas de referência adquiriram a designação do correspondente teor de cimento, 150, 250 e 400 kg/m³, precedidas de ‘M’ e de ‘R’, respectivamente, *i.e.*, M150, M250 e M400 e R150, R250 e R400. Nas betonilhas leves, os ECG substituem 80% do volume de areia. Nesta secção, expuseram-se os resultados dos ensaios de resistência mecânica realizados aos 7, 28, 56 e 84 dias de idade, bem como os correspondentes valores das massas volúmicas aparentes. A análise comparativa dos resultados, entre as betonilhas leves e as correspondentes betonilhas de referência, permitiu afirmar que a substituição de areia por 80% de agregados de cortiça expandida reduziu, tal como seria expectável, a resistência mecânica à compressão das betonilhas leves em percentagens de 86% no caso das betonilhas com menor teor de cimento, M150, 82% na betonilha M250 e 84% na betonilha com maior dosagem de cimento, M400.

2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Coutinho, A. Sousa. 1988. *Fabrico e Propriedades do Betão – Vol. 1*. Lisboa. LNEC.
- [2] Tourenq, C.; Dupont, P., Primel, L. 1990. *Granulats non traditionnels*, Granulats sous la direction de Georges Arquie et Claude Tourenq. Paris. Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussés.
- [3] Topçu, Ilker Bekir; Işikdağ, Burak. 2008. Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 204, pp. 34-38.
- [4] Tang, Chao-Wei; Chen, How-Ji ;Wang, Shun-Yuan. 2011. Production of synthetic lightweight aggregate using reservoir sediments. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 33, pp. 292–300.
- [5] Norma, NP EN 206-1:2007/Emenda 2:2010 (Ed.1). *Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. IPQ.

- [6] Nóvoa, P.J.R.O. *et al.* 2004. Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granulates. *Composites Science and Technology*. Vol. 64, pp. 2197–2205.
- [7] Gündüz, L. 2007. The effects of pumice aggregate/cement ratios on the low-strength concrete properties. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 29, pp. 594-602.
- [8] Hossain, Khandaker; M. Anwar. 2004. Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 34, pp. 283-291.
- [9] Topçu, Ilker Bekir. 1997. Semi lightweight concretes produced by volcanic slags. *Cement and Concrete Research*. Vol. 27 (1), pp. 15-21.
- [10] Bouguerra, A. *et al.* 1998. Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement and wood aggregates. *Cement and Concrete Research*. Vol. 28 (8), pp. 1179–1190.
- [11] Al Rim, K. *et al.* 1999. Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 21, pp. 269-276.
- [12] Khedari, Joseph *et al.* 2001. New lightweight composite construction with low thermal conductivity. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 23, pp. 65-70.
- [13] Demirboğa (a), Ramazan; Gül, Rüsten. 2003. Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures. *Energy and Buildings*. Vol. 35, pp. 1155-1159.
- [14] Demirboğa (b), Ramazan; Gül, Rüsten. 2003. The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 33, pp. 723-727.
- [15] Uysal, Habib *et al.* 2004. The effects of different cement dosages, slump and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete. *Cement and Concrete Reserach*. Vol. 34, pp. 845-848.
- [16] Ünal, Osman *et al.* 2007. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. *Building and Environment*. Vol. 42, pp. 584-590.
- [17] Mounanga, P. *et al.* 2008. Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 30, pp. 806-814.
- [18] Alduaij, Jamal *et al.* 1999. Lightweight concrete in hot coastal areas. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 21, pp. 453-458.
- [19] Blanco, F. *et al.* 2000. Characteristics and properties of lightweight concrete manufactured with cenospheres. *Cement and Concrete Research*. Vol. 30, pp. 1715-1722.

- [20] Wang, H. Y.; Tsai, K. C. 2006 Engineering properties of lightweight aggregate concrete made from dredged silt. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 28, pp. 481-485.
- [21] Lo, Tommy Y.; Tang, W. C.; Cui, H. Z. 2007. The effects of aggregate properties on lightweight concrete. *Building and Environment*. Vol. 42, pp. 3025-3029.
- [22] Laukaitis, A.; Fiks, B. 2006. Acoustical properties of aerated autoclaved concrete. *Applied Acoustics*. Vol. 67, pp. 284-296.
- [23] Olmeda, J. *et al.* 2012. Recycling petroleum coke in blended cement mortar to produce lightweight material for Impact Noise Reduction. *Cement & Concrete Composites*. Vols. 34, Issue 10, pp. 1194-1201.
- [24] Yasar, Ergul *et al.* 2003. Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash. *Materials Letters*. Vol. 57, pp. 2267– 2270.
- [25] Sengul, Ozkan *et al.* 2011. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy and Buildings*. Vol. 43, pp. 671-677.
- [26] Suryavanshia, Arvind K.; Swamy, R. Narayan. 2002. Development of lightweight mixes using ceramic microspheres as fillers. *Cement and Concrete Research*. Vol. 32, pp. 1783-1789.
- [27] McBride, S. P.; Shukla, A.; Bose, A. 2002. Processing and characterization of a lightweight concrete using cenospheres. *Journal of Materials Science*. Vol. 37, pp. 4217-4225.
- [28] Babu, D. Saradhi; Babu, K. Ganesh; Wee, T. H. 2005. Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. *Cement and Concrete Research*. Vol. 35, pp. 1218– 1223.
- [29] Lima, Paulo Roberto Lopes; Leite, Mônica Batista. 2010. Recycled lightweight concrete made from footwear industry waste and CDW. *Waste Management*. Vol. 30, pp. 1107– 1113.
- [30] Hossain, K. M. A., Ahmed, S., Lachemi, M. 2011. Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: mechanical and durability characteristics. *Construction and Building Materials*. Vol. 25, pp. 1186-1195.
- [31] Houaiss, A. 2003. *Dicionário da Língua Portuguesa*. Lisboa. Ed. Círculo de Leitores.
- [32] Fortes, M. Amaral. 2005. *A Cortiça*. Lisboa. IST.
- [33] Pereira, João Santos, Bugalho, Miguel Nuno, Caldeira, Maria da Conceição. 2008. *From the cork oak to cork - a sustainable system*. Coimbra. APCOR - Portuguese Cork Association.
- [34] Karade, S. R. *et al.* 2002. Cork granules as lightweight aggregate. R. K. Dhir, T. D. Dyer e J. E. Halliday. *Sustainable Concrete Construction*. London. Thomas Telford, pp. 253-262.

- [35] Boschmonart, Jesús Rives. 2011. *Environmental evaluation of the cork sector in Southern Europe (Catalonia)* - A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the PhD degree in Environmental Sciences and Technology, Universitat Autònoma de Barcelona e Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals. Barcelona, Spain.
- [36] Gil, Luís. 2009. Cork composites - a review. *Materials*. Vol. 2, pp. 776-789.
- [37] Eires, R. *et al.* 2006. New eco-friendly hybrid composite materials for civil construction. *European Conference on Composite Materials*. ECCM 12.
- [38] Kanawade, Sachin M.; Gaikwad, R. W. 2011. Removal of zinc ions from industrial effluent by using cork powder as adsorbent. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*. Vol. 2 (No.3), pp. 199-201.
- [39] Carvalho, António P. O.; Maio, Daniela J. D.; Carvalho, Francisco J. D. X. 2011. "Paint" with powered cork with optimized acoustical behavior. *NOISE-CON 2011*. Oregon. July 25-27.
- [40] Silva, S. P. *et al.* 2005. Cork: properties, capabilities and applications. *International Materials Reviews*. Vol. 50 (No.6), pp. 345-365.
- [41] Graça, J.; Pereira, H. 1997. Cork suberin: A glyrecyl based polyester. *Holzforschung*. Vol. 51 (3), pp. 225-234.
- [42] Pereira, H. 1988. Chemical composition and variability of cork from *Quercus suber* L. *Wood Science & Technology*. Vol. 22, pp. 211-218.
- [43] Srinivasan, K.; Wijesundera, N. E. 2001. Heat and moisture transport in wet cork slabs under temperature gradient. *Building and Environment*. Vol. 36, pp. 53-57.
- [44] Gil, L., Silva, P. 2011. Characterization of insulation corkboard obtained from demolitions. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*. Vol. 23 (No. 3/4).
- [45] Castro, Osvaldo *et al.* 2010. Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures. *Materials and Design*. Vol. 31, pp. 425-432.
- [46] Asdrubali, Francesco. 2006 Survey on the acoustical properties of new sustainable materials for noise control. *EuroNoise 2006*. Tampere, Finland, 30 May- 1 June, 2006.
- [47] Dart, S. L.; Guth, Eugene. 1946. Elastic properties of cork. I. Stress relaxation of compressed cork. *Journal of Applied Physics*. Vol. 17 (314).
- [48] Santos, C A. Pina, Matias, L. 2006. ITE 50 - *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*. Lisboa. LNEC, 2006.
- [49] Freitas, Vasco Peixoto; Pinto, Manuel. 1997. Metodologia para a definição exigencial de isolantes térmicos - *Nota de Informação Técnica NIT-002-LFC*. Porto. FEUP - LFC.
- [50] Freitas, Vasco Peixoto; Pinto, Paulo da Silva. 1998. Permeabilidade ao Vapor de materiais de construção. Condensações internas. *Nota de Informação Técnica - NIT 002 - LFC*. Porto. FEUP - LFC.

- [51] Azziz, M. A.; Murphy, C. K.; Ramaswamy, S. D. 1979. Lightweight concrete using cork granules. *The International Journal of Lightweight Concrete*. Vol. 2(1), pp. 29-33.
- [52] Karade, Sukhdeo R.; Irle, Mark; Maher, Kevin. Influence of granule properties and concentration on cork-cement compatibility. 2006. *Holz als Roh- und Werkstoff*. Vol. 64, pp. 281–286.
- [53] Costa, Maria L. B. 2011. *Caracterização das propriedades físicas, mecânicas e térmicas de betões com incorporação de cortiça*. FCT-UC, Coimbra.
- [54] Panesar, D. K.; Shindman, B. The mechanical transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 34, pp. 982-992.
- [55] Carvalho, R.; Teixeira-Dias, F.; Varum, H. Cyclic behaviour of a lightweight mortar with cork granulate composite. *Composite Structures*. Vol. 95, pp. 748-755.
- [56] Norma, EN 933-1:2012 (Ed.2). *Tests for geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method*. CEN.
- [57] Norma, NP EN 1097-3:2002 (Ed.2). *Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios*. Lisboa. IPQ.
- [58] Norma, NP EN 1097-6:2003/A1:2010 (Ed. 1). *Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água*. Lisboa. IPQ.
- [59] Norma, NP ISO 2030:2011 (Ed.1). *Granulados de cortiça. Análise granulométrica por peneiração mecânica*. Lisboa. IPQ.
- [60] Norma, EN 1015-11:1999/A 1:2006 (Ed. 1). *Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. CEN.
- [61] Norma, EN 1015-3:1999/A 2:2006 (Ed. 1). *Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. CEN.
- [62] Powers, T. C. 1932. Studies of workability of concrete. *Journal of the American Concrete Institute*. Vol. 28 (No.2), pp. 419-448.
- [63] Norma, NP EN 12390-3:2011 (Ed. 3). *Ensaaios do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes*. Lisboa, IPQ.
- [64] Neville, A. M. 1973. *Properties of concrete*. A. Halsted Press Book - John Wiley and Sons (2nd edition).
- [65] Dionísio, Madalena S. C. *et al.* 1995. Absorbed water in the cork structure. A study by thermally stimulated currents, dielectric relaxation spectroscopy, isothermal depolarization experiments and differential scanning calorimetry. *Journal of Materials Science*. Vol. 30, pp. 4394-4400.
- [66] Norma, EN 13318:2000. *Screed material and floor screeds*. Definitions. CEN.

[67] Norma, EN 13813:2002. *Screeds material and floor screeds*. Properties and requirements. CEN.

[68] Lo, Tommy Y. *et al.* 2008. The effect of aggregate absorption on pore area at interfacial zone of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 22, pp. 623-628.

Capítulo 3

Caracterização Higrotérmica de Betonilhas
de Cimento com Incorporação de Grânulos
de Cortiça

ÍNDICE

- 3.1. Introdução
- 3.2 Condutibilidade Térmica
 - 3.2.1 Descrição do Equipamento
 - 3.2.2 Preparação de Provetes e Descrição do Ensaio
 - 3.2.3 Resultados dos Ensaios
 - 3.2.3.1 Betonilhas com ECG, M150, M250 e M400 e betonilhas de Referência, R150, R250 e R400
 - 3.2.3.2 Argamassas BetRef, BetCort, BetArgExp e BetEPS
 - 3.2.3.3 Síntese de Resultados
- 3.3 Retenção de Humidade
 - 3.3.1 Definição das Curvas Higroscópicas através do Método das Soluções Salinas
 - 3.3.1.1 Preparação de Provetes e Descrição do Ensaio
 - 3.3.1.2 Resultados dos Ensaios
 - 3.3.1.3 Síntese de Resultados
 - 3.3.2 Definição das Curvas de Retenção através do Método dos Pratos de Pressão
 - 3.3.2.1 Descrição do Equipamento
 - 3.3.2.2 Preparação de Provetes e Descrição do Ensaio
 - 3.3.2.3 Resultados dos Ensaios
- 3.4 Transferência de Humidade
 - 3.4.1 Permeabilidade ao Vapor de Água através do Método das Tinas
 - 3.4.1.1 Preparação de Provetes e Descrição do Método de Ensaio
 - 3.4.1.2 Resultados dos Ensaios
 - 3.4.1.3 Síntese de Resultados
 - 3.4.2 Absorção de Água por Imersão Parcial
 - 3.4.2.1 Preparação de Provetes e Descrição do Método de Ensaio
 - 3.4.2.2 Resultados dos Ensaios
 - 3.4.2.3 Síntese de Resultados
- 3.5 Síntese do Capítulo
- 3.6 Anexo
- 3.7 Referências Bibliográficas

3.1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades higrotérmicas dos materiais de construção revela-se de grande importância em vários problemas de engenharia civil, dado que estas podem determinar a durabilidade dos materiais, condicionar o conforto das habitações e afectar, de forma directa, o consumo energético. A selecção de um material de construção deve ser realizada tendo em consideração um conjunto abrangente de factores, tais como a compatibilidade física, química e mecânica com os outros materiais com os quais vai permanecer na obra, as condições de exposição (*e.g.* temperatura e humidade), a sua vulnerabilidade à acção destas e, obviamente, o custo global (onde se incluem os custos directamente imputáveis ao material, os custos energéticos e os custos ambientais).

O conhecimento das propriedades dos materiais deve ser baseado em parâmetros objectivos que permitam rapidamente comparar o seu desempenho com outros materiais, designadamente quando se sobrepõem em camadas, como é o caso dos sistemas de pavimentos estratificados. A avaliação experimental das várias propriedades dos materiais revela-se determinante, não só para a previsão do desempenho dos sistemas construtivos que integram, mas, igualmente, para o desenvolvimento de modelos teóricos que proporcionem uma compreensão mais ampla dos fenómenos físicos envolvidos e a simulação do comportamento de sistemas construtivos não testados em laboratório.

A caracterização higrotérmica de um material envolve o estudo de fenómenos de transmissão de calor, de retenção de humidade e de transferência de massa (*i.e.* humidade).

Os fenómenos de transmissão de calor gerados pela existência de gradientes de temperatura assumem três modos de transmissão: convecção, radiação e condução.

A avaliação da condutibilidade térmica torna-se necessária para estudar a transmissão de calor por condução. O seu conhecimento permite, não só seleccionar os materiais mais adequados para garantir a satisfação dos requisitos de conforto higrotérmico dos edifícios, como também contribuir para o uso racional de energia. Nesta óptica, têm sido divulgados, nos últimos anos, diversos trabalhos que visam o estudo de materiais obtidos a partir de resíduos ou desperdícios industriais, com reduzida condutibilidade térmica [1-8]. Os materiais heterogéneos, tais como os materiais compósitos (*e.g.* betões, argamassas), revelam dificuldades acrescidas no que se refere ao estudo da transmissão de calor por condução, relativamente aos materiais homogéneos, havendo, pois, que atender a este facto durante a realização dos ensaios e, posteriormente, na interpretação de resultados. Al Rim *et al.* [9] demonstraram que o coeficiente de condutibilidade térmica, em betões com incorporação de argila (proveniente de resíduos aluvionares) e aparas de madeira (constituídas por 60% de desperdícios de pinho nórdico e 40%

de desperdícios de madeira tropical), diminui com o aumento da percentagem de aparas de madeira na composição do betão. Khedari *et al.* [3] estudaram o desempenho térmico de argamassas contendo fibras de coco e durião em substituição de areia e concluíram que estas argamassas apresentam condutibilidade térmica inferior à das argamassas correntes. Demirboğa e Gül [10] e Uysal *et al.* [11] estudaram a condutibilidade térmica de betões leves com incorporação de perlite expandida e agregados de pedra-pomes e em que parte do ligante, *i.e.* cimento Portland, foi substituído por cinzas volantes e por fumo de sílica. Estes autores verificaram que a inclusão destes materiais no betão reduz a sua condutibilidade térmica, relativamente ao betão convencional. Simões *et al.* [12] procederam à avaliação experimental do coeficiente de condutibilidade térmica de diversos materiais de isolamento térmico para simularem o atraso térmico de sistemas construtivos de paredes que integram os referidos materiais.

Existem diversos métodos para avaliar experimentalmente a condutibilidade térmica dos materiais de construção: Carslaw e Jaeger [13] recorreram ao método das duas sondas lineares paralelas (*two-linear-parallel-probe method*, TLPP). Kim *et al.* [14] utilizaram um equipamento cujo princípio se baseia no método anteriormente descrito, mas em que as sondas foram modificadas de modo a permitirem medições num menor intervalo de tempo. Demirboğa e Gül [10], Cerny *et al.* [15], Khan [16], André *et al.* [17] e Wong *et al.* [18] recorreram a um equipamento comercial que determina a condutibilidade térmica de materiais através de uma técnica de análise transitória baseada no princípio de *hot wire method*. Černý *et al.* [15], [19] determinaram a condutibilidade térmica de argamassas fabricadas com cimento, recorrendo a uma técnica de impulso dinâmico. Mňahončáková *et al.* [20] e Vejmelková *et al.* [21] aplicaram um método de indução de fluxos de calor através de uma resistência eléctrica para determinarem a condutibilidade térmica diversos materiais compósitos à base de cimento. Benazzouk *et al.* [5] determinaram a condutibilidade térmica de materiais compósitos fabricados com pasta de cimento e restos de borracha, através da técnica da sonda plana transitória (*transient plane source*, TPS). Jeong *et al.* [22] e Othman [23] avaliaram a condutibilidade de materiais poliméricos resilientes com o recurso ao dispositivo de medição do fluxo de calor, *heat flow meter*, descrito na norma ISO 8301:1991 [24].

Não obstante a diversidade de técnicas, que permitem a medição da condutibilidade térmica dos materiais, o método das placas quentes (*guarded hot plate method*) é o que reúne maior consenso na comunidade científica e o mais generalizado na determinação desta propriedade térmica [25], [26]. Torres [27] determinou a condutibilidade térmica de várias amostras de pedra calcária e de argamassa, através do método das placas quentes. Gonçalves e Bergmann [4] determinaram a condutibilidade térmica de isolantes fabricados com cinzas de casca de arroz, valendo-se do método das placas quentes. Asdrubali *et al.* [28] recorreram a um

dispositivo baseado no método das placas quentes e uma *hot box* para quantificar a condutibilidade térmica de placas de gesso, de aglomerado de madeira e de poliestireno expandido (EPS).

Os materiais de estrutura porosa e de poros abertos, tais como betões e argamassas, para além de armazenarem água, sob a forma de vapor, também permitem a circulação de fluidos e de iões através da sua estrutura interna. A porosidade aberta, assim como a dimensão dos poros ditam a sua vulnerabilidade à acção da água. O armazenamento de água na estrutura interna dos materiais pode ser devido à retenção de moléculas de água na superfície dos poros ou à tensão superficial que origina a condensação capilar do vapor de água e a absorção de água. A circulação de água, no interior de estruturas porosas, tem origem na combinação de múltiplos e complexos factores, tais como gradientes de pressão entre o ar e a água, gradientes de concentração, de humidade e de temperatura. Em função do tipo de potencial que origina o processo de migração, a transferência de humidade pode dar-se por difusão, por absorção e por permeabilidade.

A humidade que se introduz na estrutura de poros e capilares de um material pode ser classificada nos domínios higroscópico, capilar¹ e super-saturado, dependendo da sua fase e da força de atracção electrostática associada. O domínio higroscópico corresponde à fase de vapor, o domínio capilar à fase líquida e o domínio super-saturado ocorre, em fase líquida, quando o potencial capilar na rede de poros é nulo, originando a super-saturação [29], [30]. Para se definir o domínio higroscópico de um determinado material, é necessário estudar a sua capacidade de armazenamento de humidade, sob a forma de vapor. A higroscopicidade caracteriza a aptidão do material para reter, devido à acção de forças de Van Der Waals, moléculas de vapor de água e de as restituir ao ambiente onde se encontra, em função das variações de temperatura e de pressão parcial de vapor de água. A higroscopicidade manifesta-se para valores de humidade relativa (HR) do ar, compreendidos entre 0 e 95%². Acima deste valor médio de humidade tem início a região super-higroscópica.

Os materiais porosos são, regra geral, materiais higroscópicos. A sua higroscopicidade pode ser aferida através das curvas higroscópicas, de adsorção e de desadsorção, que relacionam o teor de humidade de equilíbrio do material com a humidade relativa do ambiente, para uma determinada temperatura. A *International Union of Pure and Applied Chemistry* [34] classifica as curvas higroscópicas dos materiais em 6 tipos (tipo I a Tipo VI). As curvas higroscópicas da generalidade dos materiais macro-porosos³ apresentam uma configuração em forma de *S*, do

¹ Também designado domínio super-higroscópico.

² Hall e Allinson [30] e Krus e Kiebl [31] referem HR=95%, enquanto Janz [32], [33] refere HR=98%. Estes valores dependem das características dos materiais.

³ São materiais cuja dimensão dos poros é superior a 0.05 μm .

tipo II [29], [31], [35]. Neste tipo de materiais, é possível distinguir 3 fases distintas: a adsorção monomolecular, a adsorção multi-molecular e a condensação capilar. Para a generalidade dos materiais macro-porosos, as curvas higroscópicas apresentam lanços diferenciados, consoante a variação de humidade relativa do meio assuma o sentido crescente, curva de adsorção, ou o sentido decrescente, curva de desadsorção. Este comportamento é designado por histerese. A histerese higroscópica significa que, para a mesma humidade relativa, o material retém teores de humidade distintos no processo de humidificação (adsorção) e no de secagem (desadsorção). Para a maioria dos materiais de construção, o facto da histerese higroscópica ser relativamente ténue possibilita que a sua caracterização se baseie na curva de adsorção ou na curva intermédia definida a partir das curvas de adsorção e de desadsorção (citado por Krus e Kiebl [31] e Künzel [36]).

De acordo com IUPAC [34], os vários processos que permitem determinar a higroscopicidade dos materiais, através da quantidade da substância gasosa que é adsorvida, dividem-se em métodos volumétricos e gravimétricos. Nos primeiros, quantifica-se o gás que é removido em fase gasosa, através de técnicas dinâmicas ou estáticas, enquanto nos segundos, determina-se directamente o aumento da massa do material higroscópico, *i.e.*, o adsorvente.

As técnicas experimentais baseadas na avaliação da variação de massa do material higroscópico carecem da simulação de diversos ambientes húmidos. Nos métodos convencionais, as humidades relativas pretendidas podem ser obtidas numa câmara climática ou recorrendo a soluções saturadas num espaço confinado, tal como é preconizado na norma EN ISO 12571:2000 [37]. Estes métodos, apesar de serem os mais generalizados, são muito morosos, pois é necessário que as amostras submetidas a esses ambientes atinjam a massa de equilíbrio. Tada [38] descreve processos alternativos para a simulação de ambientes húmidos, designadamente a variação da pressão de vapor em vácuo, a variação de temperatura ou pressão e a mistura de ar quente com ar frio (*flow division method*). Arfvidsson e Cunningham [39] referem um processo de condicionamento de amostras realizado em câmara climática, através de um fluxo de humidade unidireccional. Janz e Johannesson [33] utilizam duas técnicas distintas para definir as curvas higroscópicas de amostras de betão celular, de argamassa de cal e cimento, de tijolos de sílica e cal e de arenito: soluções salinas e a pesagem em contínuo das amostras condicionadas, através da mistura de fluxos de ar seco e de ar saturado em proporções diferentes, consoante a humidade relativa desejada, num dispositivo designado por *sorption balance*. O mesmo dispositivo, que permite obter resultados num curto período de tempo, foi usado por Peuhkuri [40], Johansson [41], Åhs [42] e Anderberg [43]. Goual *et al.* [44] utilizaram uma câmara, na qual a saturação do ambiente é obtida através de um sistema que mistura água e ácido sulfúrico em proporções distintas, consoante a humidade relativa desejada.

O método mais preciso para condicionar amostras através de soluções salinas consiste em usar os mesmos provetes ao longo de todas as etapas de adsorção e, posteriormente, de desadsorção. Deste condicionamento em contínuo do mesmo provete advêm ensaios muito demorados, pelo que alguns autores optam por usar uma série de provetes para cada etapa do ensaio, *i.e.* para cada humidade relativa, procedendo ao condicionamento das diversas séries em simultâneo, segundo um processo descontínuo [30], [45-48].

O estudo do desempenho higroscópico de vários materiais de construção é desenvolvido em distintos trabalhos [27], [30], [40], [46-50]. A utilização de soluções salinas para o condicionamento das amostras é descrita nos trabalhos de Torres [27], de Hall e Allinson [30] e de Baroghel-Bouny [49].

Para humidades relativas superiores a 95%, tem início o domínio capilar ou, igualmente designado, domínio super-higroscópico. Nesta fase, a água é retida na estrutura interna do material devido à acção da tensão superficial da água, pelo que a retenção de água no material deve ser definida a partir da pressão de água nos poros ou pressão de sucção. De acordo com Krus e Kießl [31], o domínio super-higroscópico caracteriza-se pela capacidade dos materiais de estrutura porosa e capilar reterem água até atingirem o designado teor de saturação capilar.

De acordo com Fagerlund [51], é possível determinar a pressão de água nos poros de um material através da utilização de métodos de sucção directa. Estes métodos relacionam a pressão de sucção aplicada a um determinado material com a dimensão dos seus poros, no estado de equilíbrio. Nos métodos de sucção directos, incluem-se o prato de sucção, a centrifugação, a membrana de pressão e o sistema de pratos de pressão. É igualmente possível definir as curvas de retenção a partir da avaliação experimental da dimensão e distribuição dos poros do material [32], [52] sendo, para tal, necessário considerar um modelo adequado à geometria da estrutura interna do material. Geralmente, é adoptada a configuração cilíndrica do sistema de poros [31], [32], [33], [52].

Krus e Kießl [31] utilizaram, pela primeira vez, no domínio do estudo das propriedades dos materiais de construção, um sistema de pratos de pressão⁴ para a definição das curvas de retenção de 4 tipos de arenito, de betão celular, de placas de gesso, de tijolos cerâmicos e de tijolos de areia e cal. Os resultados obtidos, através do referido sistema, foram comparados com os obtidos por meio da avaliação da dimensão dos poros com um porosímetro de mercúrio. De acordo com estes autores, a utilização do sistema de pratos de pressão garante uma descrição do domínio super-higroscópico mais adequada. Janz [32] definiu as curvas de retenção de várias amostras de materiais de construção (argamassa de cimento, argamassa de cal e cimento, betão celular autoclavado, tijolo de cal e areia siliciosa e de 2 tipos de tijolo designados *Kanic antik* e

⁴ O equipamento de pratos de pressão é correntemente usado no domínio da Geotecnia.

Kanik gul, com o recurso a um sistema de pratos de pressão e a uma membrana de pressão. Johansson [41] determinou as curvas de retenção de amostras de materiais inorgânicos, designadamente argamassa de cal e cimento, argamassa de cimento e tijolo de cal e areia siliciosa, recorrendo a um sistema de pratos de pressão. Pavlík *et al.* [53] definiram as curvas de retenção de um determinado tipo de arenito (arenito *Mšené*) usado na construção de edifícios históricos na República Checa, com o recurso a um sistema de pratos de pressão.

Os movimentos da água, em fase de vapor ou em fase líquida, através da estrutura interna dos materiais, provocam alterações na constituição, resultando na sua deterioração, tal como é documentado em diversos trabalhos [54-63].

No estado seco, quando os poros dos materiais estão vazios, a difusão de vapor de água é o processo de transferência dominante, enquanto a sucção predomina quando os materiais permanecem em contacto com água em fase líquida. Assim, quando a concentração de fluidos, no interior de um meio poroso, é relativamente reduzida, o movimento das respectivas moléculas é interpretado em termos de difusão. À medida que a concentração de fluidos aumenta, geram-se elevadas concentrações de humidade nos poros de maiores dimensões e o fenómeno é descrito através de mecanismos de sucção capilar. A absorção capilar, por seu turno, ocorre nas estruturas mais estreitas, *i.e.*, com dimensões compreendidas entre 10 nm e 10 µm, onde as forças devidas às tensões de superfície assumem valores semelhantes às forças da gravidade do fluido em fase líquida, pelo que quando um material poroso é colocado em contacto parcial com água líquida, a absorção capilar é o fenómeno predominante [60].

Os potenciais responsáveis pela difusão e pela sucção são gradientes de concentração e gradientes de pressão, respectivamente. Desta forma, a transferência de humidade sob a forma de vapor é descrita através da permeabilidade ao vapor de água, enquanto a transferência de água líquida é traduzida através da absorção capilar e da permeabilidade à água líquida [64].

A vulnerabilidade dos materiais a factores externos depende da sua permeabilidade, pelo que esta propriedade contribui significativamente para a definição da sua durabilidade [27], [65-71]. Existem diversos trabalhos nos quais se avalia a permeabilidade de betões e de argamassas ao vapor de água, à água líquida e ao ar [72-77]. A permeabilidade pode ser definida como o movimento de um fluido através de um material poroso, sob o efeito de uma pressão aplicada. A permeabilidade depende da porosidade, da intercomunicabilidade entre os poros, do seu tamanho e da sua distribuição. Em betões e argamassas, estes factores são condicionados pelas características dos seus constituintes (ligante, agregados, água e aditivos), pela respectiva proporção na composição do material compósito, pelo processo de fabrico e pela forma de aplicação. A determinação experimental da permeabilidade ao vapor de água dos materiais pode ser avaliada, recorrendo a vários processos. No entanto, o mais unânime é o designado método

das tinas. Este método é preconizado na Norma EN ISO 12572:2001 [78] e fundamenta-se na 1ª Lei de Fick.

O método das tinas foi aplicado em diversos trabalhos para a avaliação da permeabilidade ao vapor de água dos materiais [27], [66], [68], [69], [75], [76], [79]. Existem, porém, trabalhos em que são utilizados processos alternativos para a determinação da permeabilidade ao vapor de água dos materiais [15], [19], [65], [67], [72], [77], [80].

O transporte de fluidos em fase líquida, por intermédio da estrutura interna de meios porosos sólidos, e devido à acção de uma tensão de superfície que actua nos capilares, é designado por absorção de água. A absorção de água por capilaridade depende da estrutura de poros do material, do seu teor de humidade e do volume dos poros envolvidos no processo de sucção [57], [81]. Os processos laboratoriais que permitem quantificar a pressão capilar agrupam-se em métodos estáticos e dinâmicos. Nos primeiros, as medições são realizadas para sucessivos estados de equilíbrio hidrostático e os segundos baseiam-se na análise do movimento de água no interior dos materiais. Os métodos gravimétricos permitem quantificar a quantidade de humidade no interior de um material, num determinado intervalo de tempo [58]. A avaliação da distribuição da humidade através do material pode ser realizada, com recurso a técnicas de ressonância magnética [82-84], de raios gama [83], [85], de raios X [63], [86] ou radiações com feixes de neutrões [58]. A absorção de água pelos materiais pode ser avaliada à superfície ou em profundidade. Neste último caso, a água é introduzida no material através de orifícios realizados com esse propósito [57].

A absorção de água por capilaridade de materiais de construção porosos, tais como betão e argamassa, é explicada a partir da *Lei de Darcy*, que permite quantificar o fluxo de massa num meio poroso saturado. No caso dos materiais de construção de estrutura porosa, mesmo que submersos, o seu estado permanece não saturado, conforme ficou demonstrado nos trabalhos de Powers e Brownyard, Nilsson e Persson e citados por Chatterji [87].

A determinação experimental da absorção capilar, como ensaio complementar na avaliação da durabilidade de betões, através de métodos gravimétricos é realizada em vários trabalhos, designadamente [54], [56], [81], [88-97].

A absorção de água permite, igualmente, completar o perfil higrotérmico dos materiais, tal como é comprovado em diversos trabalhos. Roels *et al.* [98] estudaram a transferência de humidade em betões celulares autoclavados, através da determinação experimental das principais propriedades higrotérmicas, nomeadamente o coeficiente de absorção capilar. Zhu e Bartos [99] apresentaram um estudo sobre a permeabilidade de betão auto-compactável, no qual determinaram a absorção de água por capilaridade, através de imersão parcial, em provetes cúbicos de 150 mm de aresta; a ascensão de água por absorção capilar foi quantificada através do ganho da massa do provete em intervalos de tempo previamente definidos. Schiebl e

Wiegrink [100] estudaram os mecanismos de transferência de humidade em betonilhas à base de sulfato de cálcio, recorrendo a modelos numéricos e a ensaios laboratoriais, designadamente a determinação experimental do coeficiente de absorção de água por capilaridade, segundo a norma DIN 52617. Jiříčková e Černý [69] realizaram vários ensaios laboratoriais, entre os quais o de absorção por imersão parcial, com o objectivo de definir o comportamento relativamente aos fenómenos de transferência de humidade e de calor, de 4 tipos de lâ mineral; neste trabalho, os provetes foram lateralmente selados com resina epoxídica e a variação da massa, dos provetes parcialmente imersos, registada em contínuo. Silva *et al.* [101] avaliaram o comportamento de argamassas de revestimento fabricadas com materiais cerâmicos reciclados, em que o coeficiente de absorção de água por capilaridade, determinado de acordo com a norma EN 1015-18:2002 [102], foi um dos parâmetros de caracterização utilizados. Künzel *et al.* [103] traçaram o perfil higrotérmico de betão com $a/c=0.6$, através de um conjunto de ensaios laboratoriais, nomeadamente a determinação dos coeficientes de transporte capilar, através de uma técnica de ressonância magnética.

No presente capítulo, incluem-se as avaliações experimentais que permitiram caracterizar o comportamento higrotérmico das betonilhas com granulados de cortiça expandida (ECG), M150, M250 e M400, e das betonilhas de referência, R150, R250 e R400, cujas composições se apresentaram no Capítulo 2. Estas betonilhas são caracterizadas em termos da sua condutibilidade térmica, permeabilidade ao vapor de água e absorção de água por imersão parcial. Nas betonilhas com ECG, (M150, M250 e M400) definem-se, ainda, as curvas de adsorção higroscópica. Os resultados destes ensaios são analisados em termos da influência do teor de cimento, nas propriedades das betonilhas, e em termos do efeito da presença de ECG, nos betões. Adicionalmente, apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização higrotérmica de algumas argamassas e de alguns betões leves estruturais, realizados numa fase de trabalho inicial do presente estudo. Tal como foi explicado no Capítulo 1, os referidos materiais foram desenvolvidos no âmbito de um projecto de investigação que contemplou a sua caracterização mecânica [104] e higrotérmica. As argamassas são constituídas por cimento e água e integram agregados de argila expandida, grânulos de poliestireno expandido (EPS), ECG e areia, ou seja, agregados habitualmente usados no fabrico de betonilhas leves⁵. Os betões leves estruturais são constituídos por cimento, brita, areia e também incorporam quantidades variáveis de ECG, em substituição parcial de areia. Num dos ensaios de caracterização, concretamente a definição das curvas higroscópicas, foram também considerados os resultados de dois betões de referência, um constituído por cimento, brita, areia e água e um outro com os mesmos

⁵ As composições destas argamassas apresentam-se no anexo.

constituintes e um introdutor de ar⁶.

As argamassas são caracterizadas em termos da sua condutibilidade térmica, curvas higroscópicas de adsorção e de desadsorção, curvas de retenção e permeabilidade ao vapor de água. Os betões leves estruturais são caracterizados em termos da sua higroscopicidade, na fase de adsorção e na fase de desadsorção, definição das curvas de retenção, permeabilidade ao vapor de água e absorção de água por imersão parcial. Os resultados dos ensaios das argamassas são comparados com os dos correspondentes ensaios das betonilhas com ECG (M150, M250 e M400), por estas últimas incorporarem agregados de cortiça, alternativos à areia, aos agregados de argila expandida e aos grânulos EPS, e por apresentarem várias dosagens de cimento. Os resultados dos ensaios dos betões leves estruturais são comparados entre si por integrarem quantidades variáveis de cortiça. Neste caso, o interesse da apresentação destes resultados justifica-se com o intuito de avaliar a influência da quantidade de ECG na composição dos betões.

Nas secções seguintes, descrevem-se os procedimentos adoptados para a realização dos ensaios de caracterização higrotérmica dos materiais acima referidos. Na secção 3.2, apresentam-se os resultados de condutibilidade térmica que foi determinada através do método das placas quentes. Após esta análise, apresentam-se, na secção 3.3, as curvas higroscópicas e as curvas de retenção dos materiais. Os ensaios de higroscopicidade foram realizados a temperatura constante e através do condicionamento das amostras em seis soluções salinas e num dessecante. As curvas de retenção foram traçadas a partir dos resultados dos ensaios realizados num dispositivo de pratos de pressão. Por último, na secção 3.4, apresentam-se os resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor de água e de absorção de água por imersão parcial. Os ensaios de permeabilidade ao vapor de água foram realizados a temperatura constante, através do método das tinas. O condicionamento do ambiente no interior das tinas foi efectuado com sais de Sílica Gel (no método da tina seca) e com uma solução saturada de Nitrato de Potássio (no método da tina húmida). O capítulo termina, apresentando algumas considerações finais.

3.2 CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

Nas secções seguintes, procede-se à avaliação da condutibilidade térmica das betonilhas fabricadas com granulados de cortiça expandida (ECG), M150, M250 e M400, e das betonilhas de referência, R150, R250 e R400. Foram igualmente determinadas as condutibilidades térmicas

⁶ As composições destes betões estão definidas no anexo.

de quatro argamassas fabricadas com cimento e água e com areia e introdutor de ar (BetRef), com areia e ECG (BetECG), com agregados de argila expandida (BetArgExp) e com areia e EPS (BetEPS).

3.2.1 Descrição do Equipamento

Os ensaios de condutibilidade térmica foram realizados com o recurso ao equipamento λ Meter-Meßtechnik EP 500 (Figura 3.1), cujo princípio de funcionamento se baseia no método das placas quentes. Este equipamento quantifica o fluxo térmico que atravessa um provete colocado entre duas unidades munidas de sensores térmicos: uma placa inferior fixa e uma superior móvel que se ajusta em função da espessura do provete de ensaio. A unidade superior contém a placa quente e a unidade inferior a placa fria. Na Figura 3.1, esquematiza-se a constituição do equipamento λ Meter-Meßtechnik EP 500. Este equipamento está associado a um programa informático existente num computador através do qual os ensaios são programados.

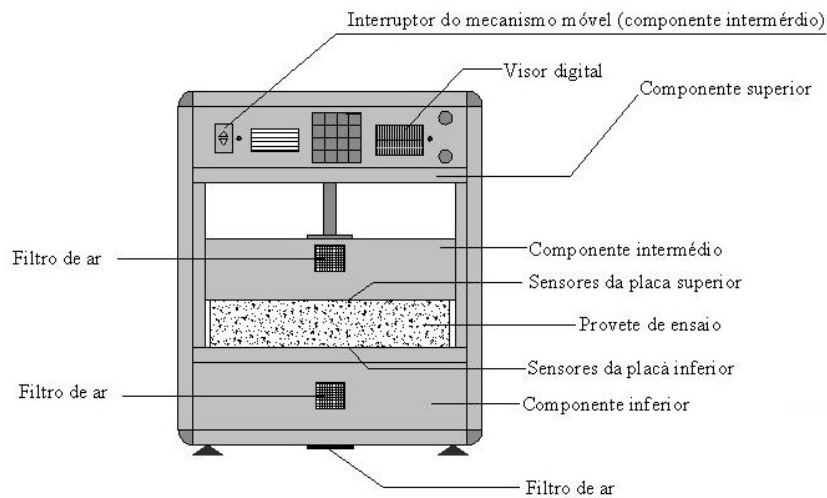


Figura 3.1 – Equipamento usado no ensaio de condutibilidade térmica.

O equipamento λ Meter-Meßtechnik EP 500 permite testar materiais até $0.50 \times 0.50 \text{ m}^2$ de superfície de contacto com as suas placas. No entanto, o fluxo de calor gerado pelo equipamento corresponde a uma superfície de área $0.15 \times 0.15 \text{ m}^2$. Os ensaios foram programados para a temperatura $T=23^\circ\text{C}$. Durante o ensaio, as placas do equipamento devem permanecer em contacto integral com as faces do provete, impondo-se, por isso, que sejam perfeitamente planas e paralelas. A placa superior móvel do equipamento desce até contactar com a superfície superior do provete. Quando o fluxo de energia que atravessa o material, colocado entre as placas, atinge o regime estacionário, é possível determinar o coeficiente de condutibilidade

térmica do material. Este equipamento permite quantificar, em apenas algumas horas, o coeficiente de condutibilidade térmica do material de ensaio, o que representa uma vantagem relativamente a outros sistemas cujo princípio de funcionamento também se baseia no método das placas quentes.

A preparação de provetes é descrita na secção seguinte. No entanto, interessa referir que no presente trabalho se utilizaram provetes com superfície de contacto $0.15 \times 0.15 \text{ m}^2$ e $40 \pm 5 \text{ mm}$ de espessura. As irregularidades das superfícies do material de ensaio foram eliminadas com recurso à aplicação de massa consistente, de forma a assegurar o contacto perfeito das suas superfícies com as placas do equipamento. O provete foi ainda envolvido lateralmente com isolante térmico de forma a evitar perdas de calor através das suas faces laterais e, assim, garantir o fluxo de calor unidireccional. O coeficiente de condutibilidade térmica foi determinado com as amostras no estado seco, pelo que se verificou a necessidade de proceder à secagem dos provetes em estufa (o que foi realizado de acordo com o estabelecido na norma ISO 12570:2000 [105]).

3.2.2 Preparação de Provetes e Descrição do Ensaio

As betonilhas foram preparadas em laboratório, de acordo com a composição e processo de fabrico descritos no Capítulo 2. Após o fabrico, moldaram-se provetes cúbicos de $0.15 \times 0.15 \times 0.15 \text{ m}^3$ que foram colocados em câmara de cura a $T=23 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa (HR) $HR=95 \pm 5\%$, tendo-se procedido à remoção dos moldes, decorridos 3 dias. Os provetes permaneceram 28 dias na câmara de cura. Após este período, os provetes foram seccionados de forma a obter prismas com as dimensões $0.15 \times 0.15 \text{ m}^2$ e espessura $40 \pm 5 \text{ mm}$ que se colocaram numa estufa a $T=105 \pm 5^\circ\text{C}$ até atingirem o equilíbrio, de acordo com a norma ISO 12570:2000 [105], *i.e.*, os provetes foram diariamente pesados até se constatar, em três pesagens consecutivas, não existir variação significativa da sua massa. Depois de arrefecidos, procedeu-se à regularização das suas faces maiores $0.15 \times 0.15 \text{ m}^2$ (Figura 3.2), com massa consistente e à selagem do provete, com película aderente. A regularização destas superfícies foi necessária para garantir o contacto total das mesmas com os sensores das placas do equipamento usado na determinação do coeficiente de condutibilidade térmica. A pressão de contacto exercida pelas placas do equipamento sobre o provete de ensaio foi 2500 Pa e a diferença de temperatura entre os pratos quente e frio foi de 15°C .

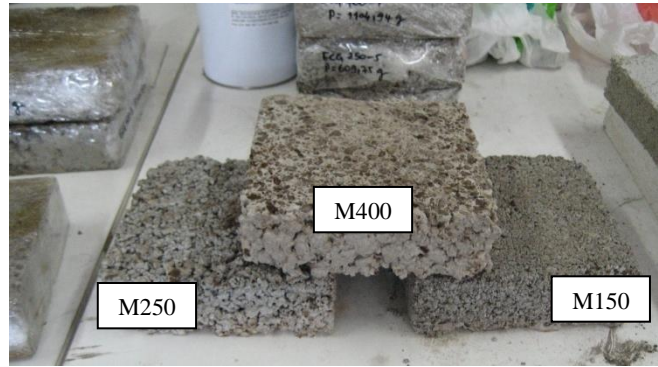


Figura 3.2 – Provetes usados no ensaio de condutibilidade térmica.

3.2.3 Resultados dos Ensaio

Nas secções seguintes, apresentam-se os coeficientes de condutibilidade térmica, λ [m.W/(m.°C)], dos vários materiais acima referidos. Os valores apresentados correspondem à média aritmética dos resultados do ensaio realizados em seis provetes.

3.2.3.1 Betonilhas com ECG, M150, M250 e M400 e betonilhas de Referência, R150, R250 e R400

Na Tabela 3.1, listam-se os coeficientes de condutibilidade térmica, λ [mW/(m.°C)], das betonilhas com ECG (M150, M250 e M400) e das betonilhas de referência (R150, R250 e R400).

Tabela 3.1 - Coeficientes de condutibilidade térmica, λ [mW/(m.°C)], das betonilhas com ECG e das betonilhas de referência.

Materiais	Condutibilidade térmica, λ
	[mW/(m.°C)]
M150	195.0 ± 5.2
M250	214.0 ± 5.6
M400	318.0 ± 7.9
R150	677.0 ± 16.2
R250	699.0 ± 16.7
R400	783.0 ± 18.7

Os resultados revelam que as betonilhas com ECG, M150, M250 e M400, apresentam os valores de λ substancialmente mais reduzidos do que as correspondentes betonilhas de referência, R150, R250 e R400. No caso em estudo, a substituição parcial de areia por ECG

resultou na redução da condutibilidade térmica, entre as betonilhas de referência e as correspondentes betonilhas com ECG, de 71, 69 e 60%, respectivamente, nas composições com 150, 250 e 400 kg/m³ de cimento. Relativamente às betonilhas com ECG, M150 é a que apresenta o menor valor do coeficiente de condutibilidade térmica [$\lambda = 195.0 \text{ mW}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$], o que não difere significativamente da exibida pela betonilha M250 [$\lambda = 214.0 \text{ mW}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$]. A betonilha M400 é aquela que apresenta o valor mais elevado de condutibilidade térmica [$\lambda = 318.0 \text{ mW}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$]. Interessa acrescentar que a betonilha com a menor dosagem de cimento, M150, é a que apresenta a menor coesão e aparenta a maior heterogeneidade.

Os resultados dos ensaios revelam ainda que, tanto nas betonilhas com ECG, como nas de referência, os valores de λ aumentam com o aumento da quantidade de cimento.

3.2.3.2 Argamassas BetRef, BetCort, BetArgExp e BetEPS

Na Tabela 3.2, apresentam-se os coeficientes de condutibilidade térmica, λ [$\text{m} \cdot \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$], das argamassas fabricadas com areia e introdutor de ar (BetRef), com ECG (BetCort), com agregados de argila expandida (BetArgExp) e com grânulos de EPS (BetEPS).

Tabela 3.2 - Coeficientes de condutibilidade térmica, λ [$\text{m} \cdot \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$], das argamassas BetRef, BetCort, BetArgExp e BetEPS.

Materiais	Condutibilidade térmica, λ
	[$\text{m} \cdot \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$]
BetRef	716.0 ± 5.2
BetCort	121.0 ± 4.6
BetArgExp	183.0 ± 5.4
BetEPS	230.0 ± 5.8

Os resultados apresentados indicam que a argamassa com ECG, BetCort, apresenta o menor valor de condutibilidade térmica [$\lambda = 121.0 \text{ mW}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$], enquanto o maior valor corresponde à argamassa de referência, BetRef [$\lambda = 716.0 \text{ mW}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$]. A argamassa com agregados de argila expandida, BetArgExp, é aquela que apresenta o valor de condutibilidade térmica [$\lambda = 183.0 \text{ mW}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$] mais próximo do valor da argamassa BetCort. É importante salientar, no entanto, que a referida argamassa é a única que não contém areia.

3.2.3.3 Síntese de Resultados

A análise dos resultados anteriores permite afirmar que as betonilhas fabricadas com ECG apresentam valores de λ significativamente mais reduzidos do que as correspondentes betonilhas de referência, *i.e.*, fabricadas apenas com areia. De facto, a incorporação de agregados leves em misturas de base cimentícia tem como efeito a redução da sua condutibilidade térmica, tal como referenciado em diversos trabalhos [3], [5], [6], [10], [106].

À medida que se aumenta a quantidade de cimento nas betonilhas, aumenta-se a sua condutibilidade térmica. Na composição das betonilhas, o acréscimo da quantidade de cimento implica maior quantidade de água, de modo a possibilitar a formação da pasta fluida que, posteriormente, endurece. Nas betonilhas com maior dosagem de cimento, existe maior quantidade de ligante (em pasta) a envolver os restantes constituintes. Nas pastas endurecidas com maior quantidade de cimento, existe maior coesão e maior quantidade de material mais condutor (pasta endurecida de cimento) e por esse motivo a condutibilidade térmica é maior.

Nas argamassas BetRef, BetCort, BetArgExp e BetEPS, verifica-se que o menor valor de condutibilidade térmica corresponde à argamassa BetCort, enquanto o maior corresponde à argamassa BetRef.

A argamassa BetCort é, de todos os materiais ensaiados, o que apresenta o menor valor de condutibilidade térmica.

3.3 RETENÇÃO DE HUMIDADE

A caracterização dos materiais em termos da sua capacidade de armazenamento de água pode ser realizada através da definição das curvas higroscópicas e das curvas de retenção. As curvas higroscópicas são definidas no domínio higroscópico, *i.e.* para $HR < 95\%$. As curvas de retenção são definidas no domínio super-higroscópico (ou capilar), *i.e.* para $HR > 95\%$.

Nas secções seguintes, apresentam-se as curvas de adsorção das betonilhas fabricadas com ECG (M150, M250 e M400). Também se definiu a curva de adsorção de uma mistura, sem aglutinante, de ECG 3/5 e ECG 5/10, na proporção 50-50% (ECG 3/5+5/10). Esta mistura solta de grânulos de ECG é idêntica, em termos de proporção granulométrica e de dimensão dos grânulos, à que integra a composição das betonilhas M150, M250 e M400. No domínio higroscópico, definiram-se, ainda, as curvas de adsorção e de desadsorção de 4 argamassas fabricadas com cimento, água e com diferentes tipos de agregados (BetRef, BetCort, BetArgExp e BetEPS), de dois betões fabricados com cimento, brita, areia e água (BR) e com cimento, brita, areia, água e introdutor de ar (BAR) e de quatro betões com cimento, brita, areia, água e

diferentes proporções de ECG, designadamente 20, 25, 30 e 40% (BE20, BE25, BE30 e BE40, respectivamente).

No domínio super-higroscópico, definiram-se as curvas de retenção de quatro argamassas fabricadas com cimento, água e com diferentes tipos de agregados (BetRef, BetCort, BetArgExp e BetEPS) e de três betões fabricados com cimento, brita, areia, água e diferentes proporções de ECG, *i.e.* 25, 30 e 40% (BE25, BE30 e BE40). Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Higrotérmica do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (DEC-UC).

Os ensaios de higroscopicidade das argamassas e dos betões foram realizados no Laboratório de Higrotérmica do DEC-UC, enquanto os ensaios de higroscopicidade das betonilhas com ECG foram efectuados no Laboratório de Higrotérmica do ITeCons.

3.3.1 Definição das Curvas Higroscópicas através do Método das Soluções Salinas

No presente trabalho, definiram-se experimentalmente as curvas higroscópicas dos materiais acima referidos, através da análise da evolução do seu teor de humidade em função da humidade relativa do ambiente. Cada ambiente foi condicionado a temperatura constante ($T=23\pm 2^{\circ}\text{C}$), com várias soluções salinas, cada uma correspondente a uma determinada humidade relativa. As curvas higroscópicas de adsorção e desadsorção foram definidas de acordo com os procedimentos preconizados na norma EN ISO 12571:2000 [37].

3.3.1.1 Preparação de Provetes e Descrição do Ensaio

A norma EN ISO 12571:2000 [37] prevê a realização dos ensaios através de 2 processos: o condicionamento de um ambiente confinado, no interior de um excicador (Figura 3.3), com o recurso a soluções salinas (ver Tabela 3.3) e a utilização de uma câmara climática em que se controla simultaneamente a temperatura e a humidade relativa pretendidas. Por se tratar de um ensaio demorado, optou-se pela realização do ensaio através do método das soluções salinas, dada a indisponibilidade da utilização das câmaras climáticas, existentes tanto no ITeCons como no DEC-UC. Assim, prepararam-se seis soluções salinas e usou-se, ainda, um dessecante, de forma a criar as condições de humidade relativa, no interior do excicador, indicadas na Tabela 3.3, à temperatura $T=23\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

Prepararam-se três provetes de cada amostra com, pelo menos, 10 g de massa. Estes provetes foram secos em estufa, de acordo com o prescrito na norma EN ISO 12570:2000 [105], até registarem massa constante. Os provetes secos foram sucessivamente colocados em

ambientes com humidades relativas crescentes, para a definição da curva de adsorção, e posteriormente em humidades relativas decrescentes, para a definição da curva de desadsorção. O processo adoptado foi contínuo, *i.e.*, foram usados os mesmos provetes no decurso de todo o ensaio, o que implicou tempos de ensaio muito longos. Os provetes permaneceram em cada ambiente até terem atingido a massa de equilíbrio. A massa de equilíbrio em cada ambiente, foi determinada quando se verificou que a variação da massa de cada provete era inferior a 0.1% da massa total, em três pesagens consecutivas realizadas em intervalos de, pelo menos, 24 horas.

O teor de água por massa, u (kg/kg), para cada humidade relativa, foi determinado através da seguinte expressão:

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (3.1),$$

em que, m (kg) representa a massa de equilíbrio do provete e m_0 (kg) a massa do provete seco em estufa.

Tabela 3.3 – Dessecante e soluções salinas usadas para condicionar o ambiente, $T = 23 \pm 0.5^\circ\text{C}$.

Dessecante	Sílica Gel	2.5±2.0%
	Cloreto Lítio	11.4±2.0%
	Cloreto de Magnésio	33.0±2.0%
Solução	Nitrato de Magnésio	53.5±2.0%
salina	Cloreto de Sódio	75.3±2.0%
	Cloreto de Potássio	84.7±2.0%
	Nitrato de Potássio	93.4±2.0%



a)



b)

Figura 3.3 - Ensaio de higroscopicidade, no domínio higroscópico: a) Monitorização da humidade relativa no interior do excicator; b) Condicionamento das amostras numa das etapas do ensaio de adsorção.

3.3.1.2 Resultados dos Ensaio

Nesta secção, apresentam-se as curvas de adsorção das betonilhas fabricadas com ECG, (M150, M250 e M400) e da mistura solta (ECG 3/5+5/10) e as curvas de adsorção e de desadsorção das quatro argamassas (BetRef, BetCort, BetArgExp e BetEPS), de dois betões estruturais (BR e BAR) e dos quatro betões estruturais leves com ECG (BE20, BE25, BE30 e BE40). As curvas foram obtidas a partir dos pontos que correspondem ao teor de humidade de equilíbrio em cada ambiente, representando cada ponto a média aritmética do teor de água de três provetes da mesma amostra.

3.3.1.2.1 Betonilhas com ECG, M150, M250 e M400 e Mistura Solta ECG(3/5+5/10)

No gráfico da Figura 3.4, representam-se as curvas higroscópicas das betonilhas leves com ECG (M150, M250 e M400) e da mistura solta de ECG (ECG(3/5+5/10)). Para estes materiais apenas se apresentam as curvas de adsorção, uma vez que as betonilhas foram os últimos materiais fabricados, tendo escasseado tempo para realizar o ensaio de desadsorção higroscópica e apresentar as correspondentes curvas.

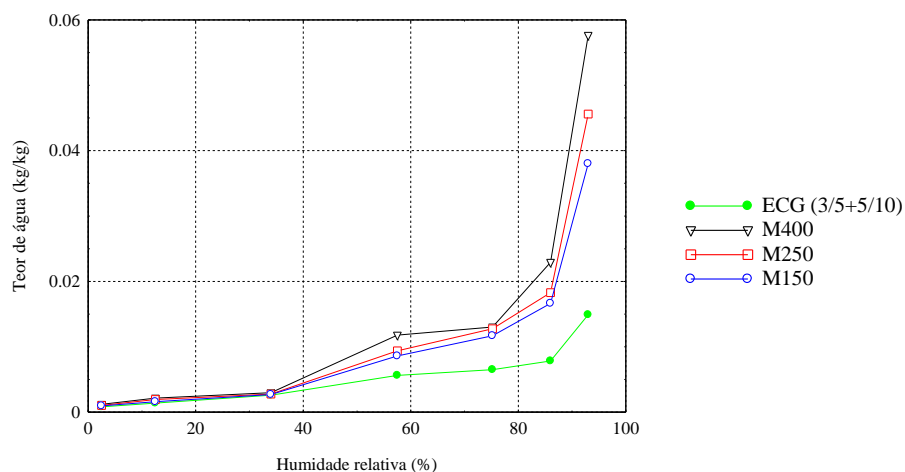


Figura 3.4 – Curvas de adsorção higroscópica das betonilhas leves com ECG, M150, M250 e M400 e da mistura solta de ECG, ECG (3/5+5/10).

As curvas de adsorção higroscópica apresentadas são do tipo II, de acordo com a classificação IUPAC [34], e revelam que, à medida que a humidade relativa aumenta, o teor de humidade dos materiais também aumenta, sendo, no entanto, notória a existência de dois níveis distintos de retenção de água: o primeiro verifica-se até HR=33.0%, *i.e.*, o declive das curvas apresenta-se menos inclinado, enquanto, para humidades relativas superiores àquele valor, o segundo nível, verifica-se um acentuado aumento do declive das mesmas curvas. Este

comportamento, traduzido pelas curvas de adsorção higroscópica, corresponde à fixação de uma camada de moléculas de água na superfície dos poros (até HR=33.0%) e posteriormente à sobreposição de várias moléculas de água (adsorção multi-molecular). A análise dos resultados dos ensaios demonstra que, para HR=93.4%, a betonilha M400 apresenta o maior valor do teor de humidade, *i.e.* $u=0.058\text{kg/kg}$, enquanto a betonilha M150 apresenta o menor, ou seja, $u=0.038\text{kg/kg}$. Na mesma figura, apresenta-se a curva de adsorção higroscópica de ECG sem aglutinante, ECG(3/5+5/10), cuja análise revela que o teor de água adsorvido é menor (em todos os ambientes) quando comparado com as betonilhas fabricadas com ECG. Neste caso, o máximo valor registado é $u=0.015\text{kg/kg}$ (para HR=93.4%).

3.3.1.2.2 Argamassas BetRef, BetCort, BetArgExp e BetRef

As curvas higroscópicas das argamassas BetRef, BetCor, BetArgExp e BetEPS, representadas na Figura 3.5, traduzem o seu comportamento na fase de retenção de humidade na superfície dos poros (curva de adsorção) e na fase da sua restituição ao ambiente (curva de desadsorção). As curvas representadas são do tipo II, de acordo com a classificação IUPAC [34]. As curvas de adsorção revelam um gradual aumento do teor de humidade das argamassas, à medida que a humidade relativa aumenta. Neste caso, é igualmente notório o declive mais acentuado das curvas de adsorção a partir do ambiente HR=33.0% e que corresponde à adsorção multi-molecular. A observação das curvas higroscópicas permite identificar o comportamento em histerese, característico de materiais higroscópicos porosos [30], [31], entre a fase de adsorção e a fase de desadsorção, ou seja, quando se revertem as condições de temperatura e de humidade relativa.

A análise das curvas higroscópicas permite afirmar que, na fase de adsorção, as argamassas BetRef e BetCort apresentam desempenhos higroscópicos similares. Na fase de desadsorção, verifica-se que a argamassa BetCort retém maior quantidade de água, entre HR=33.0% e HR=93.4%, e que a sua restituição ao ambiente é mais gradual, quando comparada com a argamassa BetRef. Na fase de adsorção, as argamassas BetArgExp e BetEPS demonstram maior higroscopicidade, relativamente às argamassas BetRef e BetCort, na presença de ambientes com HR>33.0%. Na fase de desadsorção, a maior capacidade de retenção de água destas argamassas é notória em todos os ambientes testados. Constata-se que a argamassa BetEPS apresenta um aumento acentuado de retenção de água no ambiente mais húmido (HR=93.4%), quando comparado com as restantes argamassas, e que se traduz no valor mais elevado do teor de humidade registado nesse ambiente, *i.e.*, $u=0.090\text{kg/kg}$.

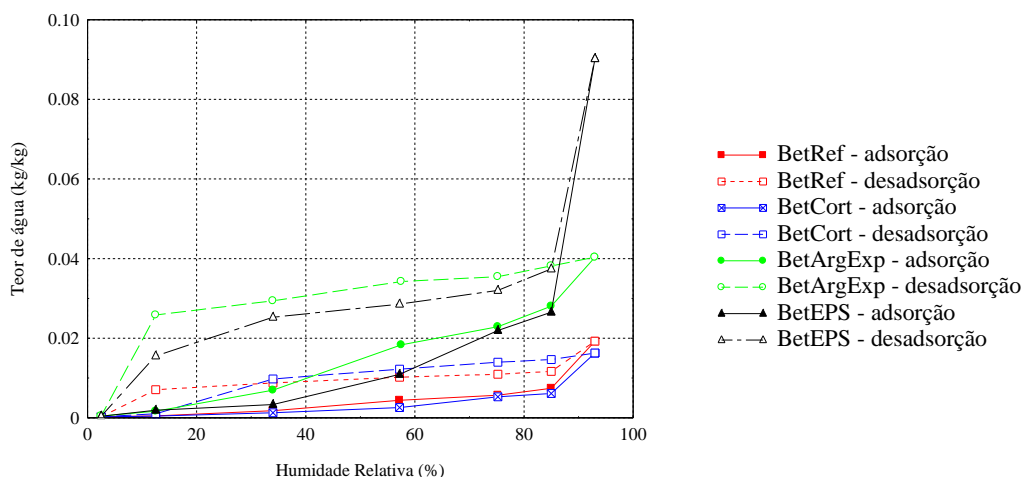


Figura 3.5 – Curvas higroscópicas de adsorção (linha contínua) e de desadsorção (linha interrompida) de betonilhas fabricadas com agregados minerais (BetRef), com agregados de argila expandida (BetArgExp), com grânulos de poliestireno (BetEPS) e com ECG (BetCort).

3.3.1.2.3 Betões BR, BAR, BE20, BE25, BE30 e BE40

Para compreender melhor o efeito da incorporação de ECG (*i.e.*, o aumento da quantidade de ECG), na composição de materiais compósitos de base cimentícia, apresentam-se as curvas de adsorção e de desadsorção de seis betões fabricados com cimento Portland, areia, brita e água (BR), com introdutor de ar (BAR), com 20, 25, 30 e 40% de ECG (BE20, BE25, BE30 e BE40, respectivamente). Estes betões têm iguais dosagens de cimento. Os betões BR e BAR têm idênticas composições de agregados minerais e de água. No entanto, o betão BAR contém adicionalmente introdutor de ar. Nos gráficos da Figura 3.6, representam-se as curvas de adsorção e de desadsorção higroscópicas dos referidos betões.

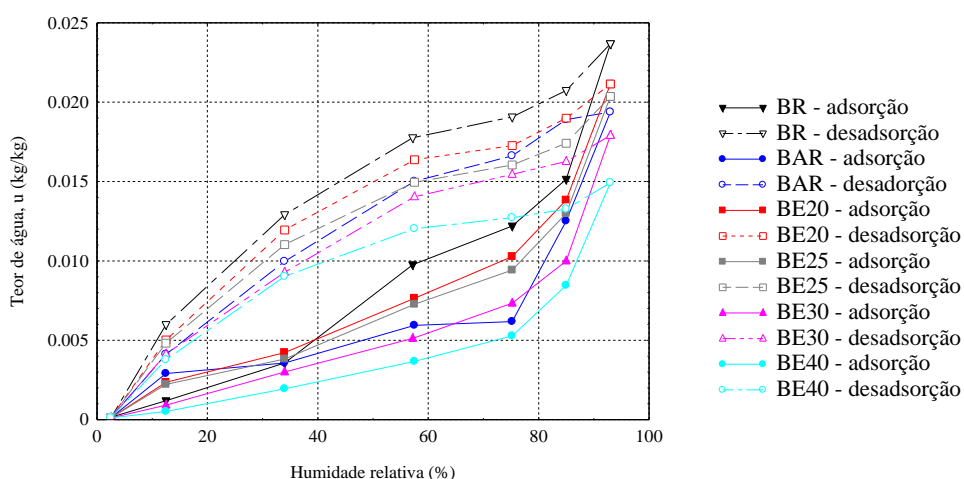


Figura 3.6 – Curvas higroscópicas de adsorção (linha contínua) e de desadsorção (linha interrompida) de betões fabricados com agregados minerais (BR), com agregados minerais e introdutor de ar (BAR) e com ECG (BE20, BE25, BE30 e BE40).

As curvas de adsorção revelam que, à medida que se aumenta a humidade relativa do ambiente, aumenta o teor de água dos betões. As curvas representadas são do tipo II, de acordo com a classificação IUPAC [34]. Através da sua observação, é possível identificar o comportamento em histerese, característico de materiais higroscópicos porosos [30], [31], entre a fase de adsorção e a fase de desadsorção.

Através da comparação das curvas higroscópicas exibidas pelos betões BR e BAR (Figura 3.6), depreende-se que a inclusão de introdutor de ar tem como efeito uma maior capacidade de retenção de água nos ambientes menos húmidos, *i.e.* até HR=33.0%, e uma menor capacidade de retenção nos ambientes mais húmidos (a partir daquele valor de HR). Seria expectável que o betão BAR apresentasse, relativamente ao betão BR, maior capacidade de retenção de água em todo o domínio higroscópico. No entanto, o comportamento traduzido pelas curvas higroscópicas poderá ser justificado pela forma e dimensão dos poros, as quais não foram investigadas no presente trabalho. Verifica-se, também, que o teor de água exibido pelo betão BAR é sucessivamente crescente, ainda que a sua variação entre os ambientes HR=53.5% e HR=75.3% seja muito reduzida.

Através da análise e comparação das curvas higroscópicas, de adsorção e de desadsorção, dos betões com ECG (Figura 3.6), é possível afirmar que à medida que se aumenta a quantidade de ECG no betão, diminui a sua capacidade de retenção de água. Os maiores teores de água estão associados ao betão BE20 e os menores ao betão BE40. No ambiente HR=93.4%, os teores de água registados foram $u=0.021\text{kg/kg}$, $u=0.020\text{kg/kg}$, $u=0.018\text{kg/kg}$ e $u=0.015\text{kg/kg}$, respectivamente, para os betões estruturais leves BE20, BE25, BE30 e BE40.

3.3.1.3 Síntese de Resultados

A análise e comparação dos resultados dos ensaios de higroscopicidade permitem afirmar que a mistura de ECG sem ligante, ECG(3/5+5/10), retém menor quantidade de água do que as betonilhas de cimento e areia que incorporam os mesmos tipos de ECG (M150, M250 e M400).

Para a maioria dos ambientes estudados, não se verificam diferenças significativas nos valores dos teores de água retidos nas betonilhas fabricadas com ECG (M150, M250 e M400), excepto no ambiente mais húmido, HR=93.4%, em que essas diferenças são mais evidentes. No entanto, e apesar dos resultados obtidos não serem conclusivos, afigura-se que à maior quantidade de cimento corresponde a maior capacidade de retenção de água.

Da comparação das curvas higroscópicas das argamassas (ver Figura 3.5), verifica-se que as argamassas BetArgExp (com agregados de argila expandida) e BetEPS (com grânulos de EPS) apresentam maior capacidade de retenção de água quando comparadas com as argamassas

BetCort (com ECG) e BetRef. As argamassas BetCort e BetRef apresentam um desempenho higroscópico similar entre si, nomeadamente na fase de adsorção.

A comparação das curvas higroscópicas dos betões (Figura 3.6) permite afirmar que a introdução de ECG na sua composição reduz a capacidade de retenção de água. Estes resultados estão em consonância com os ensaios de higroscopicidade realizados com ECG(3/5+5/10) e com as betonilhas com ECG. Apesar de se evidenciar um decréscimo na capacidade de retenção de água dos betões, à medida que se aumenta a quantidade de ECG, não foi possível definir uma relação de proporcionalidade entre o desempenho higroscópico e a quantidade de ECG presente nos betões estudados.

3.3.2 Definição das Curvas de Retenção através do Método dos Pratos de Pressão

No domínio super-higroscópico, a fixação de humidade é regida pela condensação capilar. Assim, os métodos apresentados em 3.3.1, para a definição da retenção de humidade, através de uma relação directa entre a humidade relativa e o teor de humidade do material, não são aplicáveis no domínio capilar. Para $HR > 95\%$, a retenção de água no material deve ser definida a partir da pressão de água nos poros (ou pressão de sucção).

Nesta secção, incluem-se as descrições de procedimentos experimentais que permitiram definir as curvas de retenção de quatro argamassas, fabricadas com diversos agregados minerais (BetRef, BerCort, BetArgExp e BetEPS) e de três betões estruturais com ECG, designadamente 25, 30 e 40% (BE25, BE30 e BE40). As curvas de retenção foram definidas de acordo com os procedimentos preconizados na norma NT BUILD 481:1997 [107].

3.3.2.1 Descrição do Equipamento

O recurso a um sistema de pratos de pressão, semelhante ao que é utilizado na área da Geotecnia, permite obter a pressão de água nos poros, ou sucção capilar, no domínio super-higroscópico. O princípio subjacente a este método consiste em forçar a saída de água de provetes saturados, através da aplicação de uma determinada pressão. Através de incrementos sucessivos da pressão capilar, e da avaliação do correspondente teor de água, é possível definir a curva de retenção do material.

No presente trabalho, recorreu-se ao equipamento apresentado na Figura 3.7. O dispositivo dos pratos de pressão é constituído por um recipiente estanque que recebe ar comprimido a partir de um compressor. A pressão no interior do recipiente é monitorizada

através de um manómetro e regulada por meio de redutores de pressão.

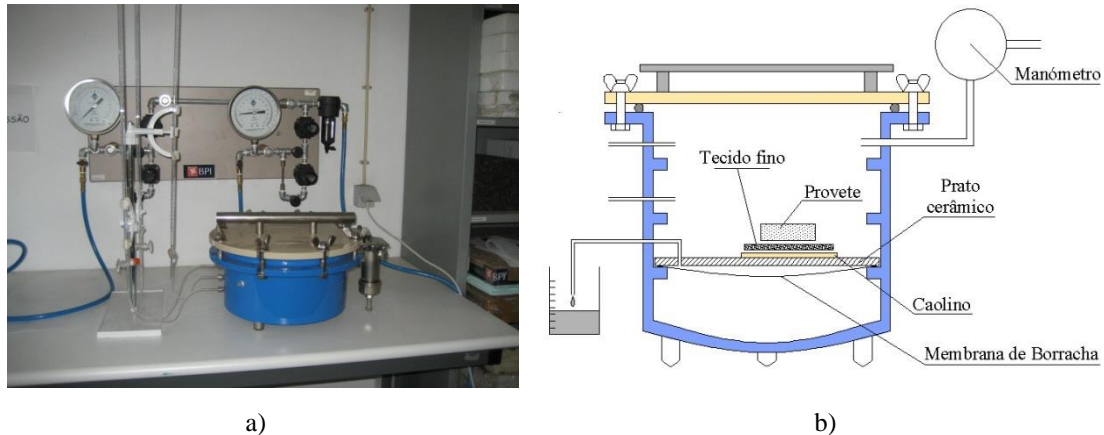


Figura 3.7 - Sistema de pratos de pressão usado para a definição das curvas de retenção: a) Aspecto geral do sistema com o recipiente que pode ser submetido a 15 bar de pressão; b) Esquematisação do dispositivo dos pratos de pressão.

No Laboratório de Higrotérmica do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, onde parte dos ensaios foram realizados, existem dois recipientes sob pressão que permitem a realização de ensaios até 5 bar e até 15 bar de pressão. A pressão mínima admissível no sistema é 0.1 bar. No interior de cada recipiente, são colocados pratos cerâmicos providos de poros com diferentes diâmetros, consoante a pressão que se pretende aplicar. Os poros de maior diâmetro referem-se aos pratos cerâmicos que suportam a menor pressão. Os pratos cerâmicos apresentam a face inferior selada por uma membrana de borracha que evita perdas de água através dessa superfície. No interior do recipiente, cada prato cerâmico está ligado ao exterior por meio de um tubo de borracha, através do qual a água do provete é eliminada. No estudo realizado, usaram-se pratos cerâmicos de 1, de 3 e de 15 bar.

3.3.2.2 Preparação de Provetes e Descrição do Ensaio

Foram testados 10 provetes de cada amostra. Os provetes usados nos ensaios foram seccionados com as dimensões $0.040 \times 0.040 \times 0.015 \text{ m}^3$, admitindo-se variações de $(\pm 2)\text{mm}$ em cada dimensão. Os pratos cerâmicos, sobre os quais se colocaram os provetes, foram saturados em água, durante as 24 horas que precederam o início dos ensaios.

Os provetes foram secos em estufa até ao ponto de equilíbrio da massa, confirmado através da variação de massa inferior a 0.1%, em pesagens sucessivas com intervalos de 6 horas. A temperatura de secagem em estufa depende das características do material em análise, tendo-se, por tal motivo, seguido as recomendações da norma EN ISO 12570:2000 [105].

Após a secagem, os provetes foram colocados num excicador, até terem atingido a

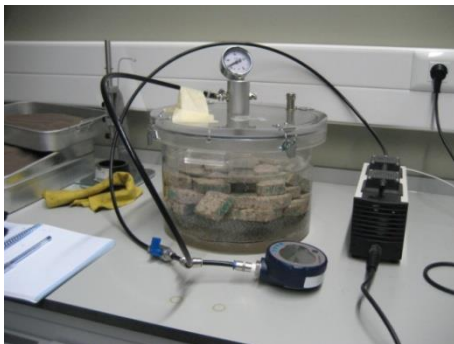
temperatura ambiente e, posteriormente, foram saturados em água sob uma pressão de 100 Pa, durante 3 horas (Figura 3.8 a)). Depois de permanecerem 1 hora em repouso, determinou-se a massa dos provetes saturados e imersos. Removido o excesso de água da sua superfície, foi realizada uma nova pesagem correspondente à condição de superfície seca saturada.

Os provetes foram, então, colocados sobre o prato cerâmico (Figura 3.8 b)). De forma a garantir a ligação capilar entre o provete e o prato, foi aplicada uma camada, entre 5 e 10 mm de espessura, de pasta de caolino⁷ sobre a face superior do prato cerâmico. Entre o provete e a pasta, foi aplicado um tecido fino que evita a contaminação da amostra pela pasta argilosa. O recipiente foi hermeticamente fechado, de forma a ser possível aplicar a primeira pressão de ensaio, *i.e.* 0.1 bar. As pressões de sucção que foram testadas são as indicadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Pressões de sucção, ΔP (bar), e correspondentes valores de humidade relativa, ϕ (-) (com $\phi=HR/100$) [107].

ΔP (Pa)	ΔP (bar)	ϕ (-)	HR (%)
$10^{4.0}$	0.100	0.999927	99.9927
$10^{4.5}$	0.316	0.999770	99.9770
$10^{5.0}$	1.000	0.999270	99.9270
$10^{5.5}$	3.160	0.997700	99.7700

As pressões aplicadas forçam a saída do excesso de água retida no interior do provete. A água em excesso é expelida através do tubo associado ao prato cerâmico e que está ligado a uma bureta graduada, no exterior do recipiente sob pressão (Figuras 3.7 e 3.8 b)). Assim que seja confirmado o estado de equilíbrio, determina-se a massa de cada provete. De acordo com a norma NT BUILD 481:1997 [107], considera-se que se atinge o ponto de equilíbrio, para cada pressão aplicada, quando o fluxo de água na bureta não ultrapassar 0.05 cm^3 , durante 48 horas. A expressão (3.2) permite determinar o teor de humidade podendo-se, assim, traçar as curvas de retenção dos materiais estudados.



a)



b)

Figura 3.8 - Ensaio para definição das curvas de retenção: a) Saturação dos provetes em vácuo; b) Provetes sobre o prato cerâmico no interior do recipiente de pressão.

⁷ A pasta de caolino foi preparada misturando 125g de caolino em pó com 150 g de água.

Após a obtenção da massa do provete no ponto de equilíbrio, é aplicada uma nova camada de pasta de caolino, repetindo-se o procedimento anteriormente descrito para cada valor de pressão de sucção.

O teor de humidade em massa por unidade de massa, u^* (kg/kg), é determinado através da seguinte expressão:

$$u^* = \frac{m_w - m_0}{m_0} \quad (3.2),$$

onde m_w (kg) representa a massa dos provetes no ponto de equilíbrio, *i.e.* depois de aplicada a pressão de sucção e de verificado o equilíbrio no nível da bureta e m_0 (kg) a massa dos provetes no estado seco.

O teor de humidade de saturação, ou teor de saturação capilar, u^*_c (kg/kg), corresponde ao máximo teor de humidade das amostras, em massa por unidade de massa.

3.3.2.3 Resultados dos Ensaios

O estudo de caracterização da capacidade de armazenamento de humidade na região super-higroscópica foi realizado nas argamassas BetRef, BetArgExp, BetEPS e BetCort, e nos betões estruturais leves com ECG (BE25, BE30 e BE40), através das curvas de retenção. As curvas foram delineadas a partir dos pontos que correspondem ao teor de humidade de equilíbrio, u^* (kg/kg), em cada ambiente, HR (%), representando cada ponto a média aritmética do teor de água de três provetes da mesma amostra. A partir destes resultados, é possível definir o teor de humidade de saturação, u^*_c (kg/kg).

3.3.2.3.1 Argamassas BetRef, BetCort, BetArgExp e BetEPS

No gráfico da Figura 3.9, apresentam-se as curvas de retenção das argamassas BetRef, BetArgExp, BetEPS e BetCort. A comparação destas curvas permite verificar que a argamassa BetCort é aquela que evidencia a maior capacidade de retenção de água, no domínio super-higroscópico, enquanto a argamassa BetRef exhibe a menor capacidade de retenção de humidade. As curvas das argamassas BetArgExp e de BetEPS têm aproximadamente o mesmo comportamento até atingirem a pressão de sucção de 1 bar (HR=99.927%). No ensaio realizado à pressão de 3.16 bar (HR=99.77%), verificou-se que a argamassa BetArgExp reteve maior quantidade de água do que a argamassa BetEPS. No entanto, seria necessário realizar ensaios com mais pressões de sucção (e de valores crescentes), para se poder afirmar que a argamassa BetArgExp mantém a referida tendência. A análise de resultados de u^*_c indica que a argamassa

BetCort é a que apresenta o maior teor de humidade de saturação ($u^*_c=0.411$ kg/kg), enquanto a argamassa BetRef exhibe o menor valor ($u^*_c=0.068$ kg/kg).

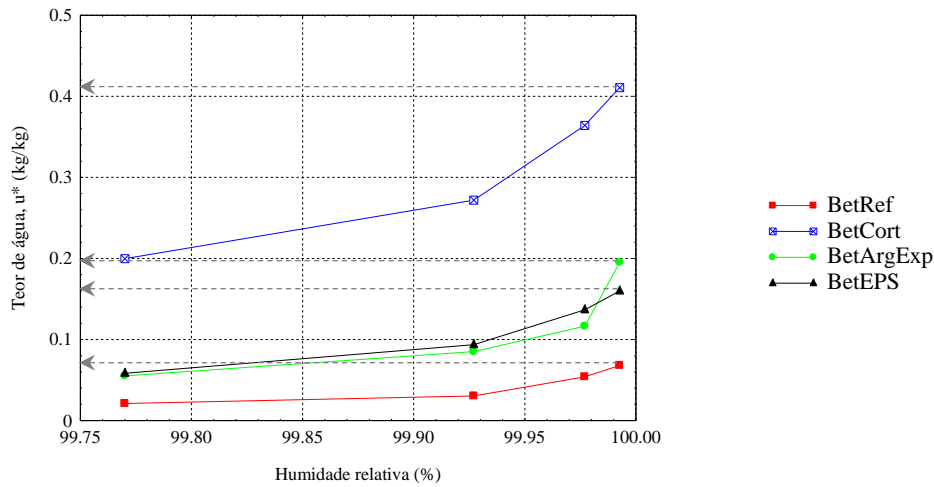


Figura 3.9 – Teor de humidade, u^* (kg/kg), em função da humidade relativa, HR (%), das argamassas fabricadas com agregados minerais (BetRef), com agregados de argila expandida (BetArgExp), com grânulos de EPS (BetEPS) e com ECG (BetCort).

3.3.2.3.2 Betões leves BE25, BE30 e BE40

Na Figura 3.10, representam-se as correspondentes curvas de retenção dos betões estruturais leves BE25, BE30 e BE40.

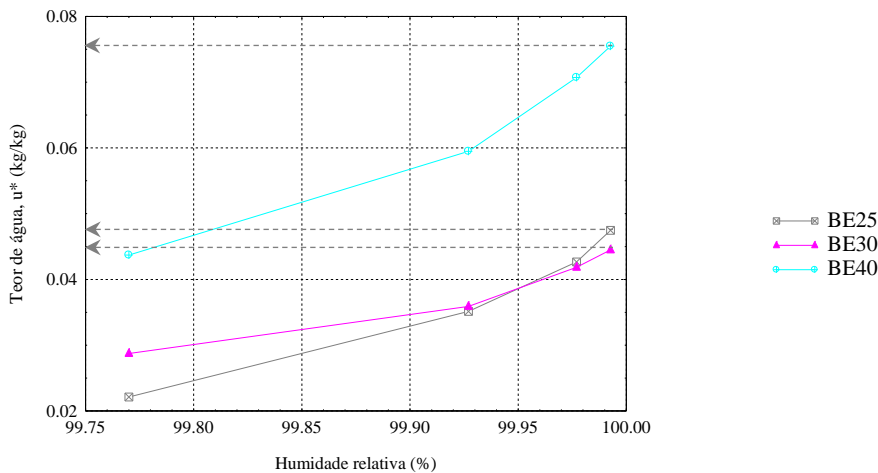


Figura 3.10 – Teor de humidade em massa por unidade de massa, u^* (kg/kg), em função da humidade relativa, HR (%), dos betões estruturais leves fabricados com ECG, BE25, BE30 e BE40.

Da análise das curvas de retenção, verifica-se que o betão BE40 apresenta maior capacidade de retenção do que os betões BE25 e BE30 que apresentam um comportamento semelhante entre si. O maior teor de humidade de saturação corresponde ao betão BE40

($u^*_c = 0.075$ kg/kg), enquanto o betão BE30 apresenta o menor valor ($u^*_c = 0.045$ kg/kg) que não difere significativamente daquele exibido pelo betão BE25 ($u^*_c = 0.047$ kg/kg). A semelhança entre estes resultados está de acordo com o que seria expectável, já que a quantidade de ECG nos betões BE25 e BE30 apenas difere em 5%. A análise e comparação de resultados indiciam que, quanto maior for a quantidade de ECG, maior será a capacidade de retenção de água do betão, no domínio super-higroscópico.

Da comparação do desempenho dos betões com ECG, depreende-se que a quantidade de ECG influencia a capacidade de retenção de água, tanto nos domínios higroscópico como no super-higroscópico. No domínio higroscópico, verifica-se um aumento da higroscopicidade com a redução da quantidade de ECG nos betões. No domínio super-higroscópico, afigura-se uma tendência contrária, *i.e.* o betão com a maior quantidade de ECG revela a maior capacidade de retenção de água. Interessa, porém, salientar que apenas foram testados três betões com proporções distintas de ECG.

3.4 TRANSFERÊNCIA DE HUMIDADE

Na presente secção, os mecanismos de transferência de humidade são abordados em termos de difusão e em termos da absorção de água. Avalia-se a permeabilidade ao vapor de água das betonilhas com ECG (M150, M250 e M400), das betonilhas de referência (R150, R250 e R400), das argamassas, BetRef, BetCort, Bet ArgExp e BetEPS, e dos betões com ECG (BE25, BE30 e BE40). Foram realizados ensaios de absorção de água por imersão parcial das betonilhas com ECG (M150, M250 e M400), das betonilhas de referência (R150, R250 e R400) e dos betões estruturais com ECG (BE25, BE30 e BE40), com o objectivo de avaliar o efeito da presença de ECG na resposta destes materiais à absorção de água.

3.4.1 Permeabilidade ao Vapor de Água através do Método das Tinas

A permeabilidade pode ser definida como o movimento de um fluido através de um material poroso, quando submetido a variação de pressão. Os ensaios de permeabilidade ao vapor de água foram realizados segundo o método das tinas, tal como previsto na norma EN ISO 12572:2001 [78]. Os resultados apresentados correspondem à média dos valores registados em cinco provetes.

3.4.1.1 Preparação de Provetes e Descrição do Método de Ensaio

O fluxo de difusão de vapor de água, Δm_{12} (kg/s), é determinado através da seguinte expressão:

$$\Delta m_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad (3.3),$$

em que $(m_2 - m_1)$ corresponde à variação de massa registada, em quilograma, durante o intervalo de tempo $(t_2 - t_1)$, em segundos. A densidade do fluxo de difusão de vapor de água, g [kg/(s.m²)] é calculada a partir do declive da recta, definida através do fluxo de difusão de vapor de água depois de estabelecida a corrente estacionária de difusão, G (kg/s), e da área de exposição do provete, A (m²), através da seguinte expressão:

$$g = \frac{G}{A} \quad (3.4).$$

A permeância à difusão de vapor de água, W [kg/(m².s.Pa)], é calculada através da seguinte expressão:

$$W = \frac{G}{A \cdot \Delta p_v} \quad (3.5),$$

em que Δp_v (Pa) é a diferença de pressão de vapor de água entre as faces expostas do provete durante o ensaio. A resistência à difusão de vapor de água, Z [(m².s.Pa)/kg], é:

$$Z = \frac{1}{W} \quad (3.6).$$

O coeficiente de permeabilidade ao vapor de água, δ [kg/(m.s.Pa)], é determinado em função da espessura, d (m), do provete de ensaio:

$$\delta = W \cdot d \quad (3.7).$$

É ainda possível definir o factor de resistência ao vapor de água, μ , em função do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar, δ_a [kg/(m.s.Pa)], e do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material, δ , através da seguinte relação:

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (3.8).$$

Para a realização dos ensaios, utilizaram-se provetes cilíndricos com 0.105 m de diâmetro que foram secos em estufa (Figura 3.11 a)) até se verificar a estabilização da sua massa, de

acordo com o estabelecido na norma ISO 12570:2000 [105]. As amostras com ECG foram secas à temperatura de $T=40\pm 5^{\circ}\text{C}$ e as de agregados minerais a $T=105\pm 5^{\circ}\text{C}$. Após a estabilização da massa, os provetes foram arrefecidos num excicador, até terem atingido a temperatura ambiente, tendo sido posteriormente condicionados, numa câmara climática a $T=23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR}=50\pm 5\%$ (Figura 3.11 b)).



Figura 3.11 - Procedimento preparatório do ensaio de permeabilidade ao vapor de água, de acordo com a norma EN ISO 12572:2001 [78]: a) Secagem em estufa; b) Condicionamento em câmara climática ($T=23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR}=50\pm 5\%$).

Durante o processo de condicionamento, as amostras cilíndricas foram periodicamente pesadas, de forma a avaliar a sua variação de massa. Os cilindros foram retirados da câmara climática, quando se verificou que, em três pesagens consecutivas intervaladas de 24 horas, a variação de massa foi inferior a 5% relativamente à massa total, de acordo com a norma ISO 12570:2000 [105].

Para o ensaio da tina seca, utilizaram-se sais de Sílica Gel, da marca comercial *Panreac*, como dessecante. Este dessecante permite simular um ambiente com $\text{HR}=2.5\pm 2\%$, à temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$. No ensaio da tina húmida recorreu-se a uma solução saturada de Nitrato de Potássio, da marca comercial *Panreac*. Esta solução permite condicionar um ambiente com $\text{HR}=93.4\pm 2\%$ a $T=23\pm 2^{\circ}\text{C}$. As condições ambientais criadas pelo dessecante e pela solução saturada foram monitorizadas, através de sondas de análise de temperatura e de humidade relativa.

Os cilindros das amostras foram selados às tinas de vidro, contendo o dessecante e a solução saturada, de acordo com o método da tina seca e da tina húmida, respectivamente (Figuras 3.12 e 3.13). A selagem dos cilindros às tinas foi realizada com o recurso a um cordão de silicone, aplicado no bordo da tina de vidro e posteriormente com o revestimento lateral da zona da junta com uma fita adesiva impermeável ao vapor de água. Seguidamente, todos os provetes foram lateralmente revestidos, pelo exterior, com parafina, de forma a garantir que as trocas de vapor entre o interior e o exterior da tina de vidro só fossem possíveis através dos

topos superior e inferior da amostra cilíndrica, ou seja, para assegurar um fluxo unidireccional de vapor de água.

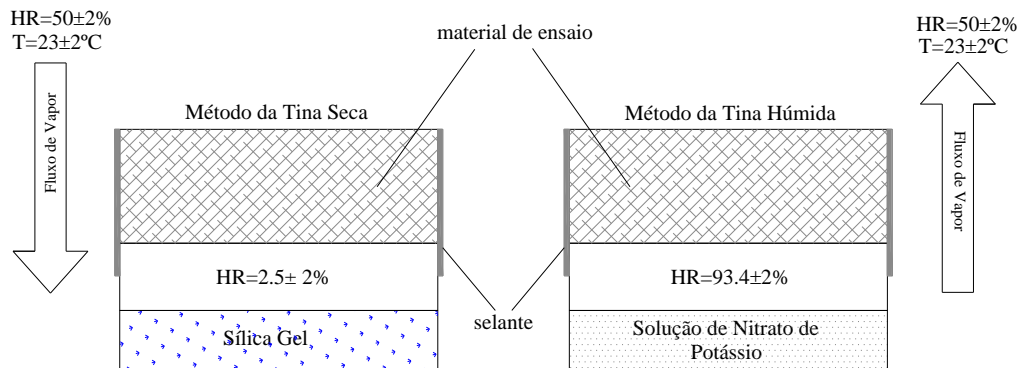


Figura 3.12 - Esquemática do método das tinas, de acordo com a norma EN ISO 12572:2001 [78].

As tinas seladas foram colocadas numa câmara climática com $T=23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $HR=50\pm 5\%$. A difusão de vapor de água, através do material a ensaiar, foi controlada por pesagens periódicas. Foi usada uma balança com a precisão de 0.01 g. O ensaio terminou quando se garantiu que não houve variação significativa da massa por unidade de tempo, ou seja, quando o fluxo de vapor de água permaneceu constante. O ponto de equilíbrio foi atingido quando se verificou variação linear ao longo do tempo, em 5 pesagens consecutivas, de acordo com a norma EN ISO 12572:2001 [78]. Nestas condições, é, então, possível determinar os parâmetros relacionados com a difusão de vapor de água através do material a ensaiar, de acordo com as expressões (3.3) a (3.8).

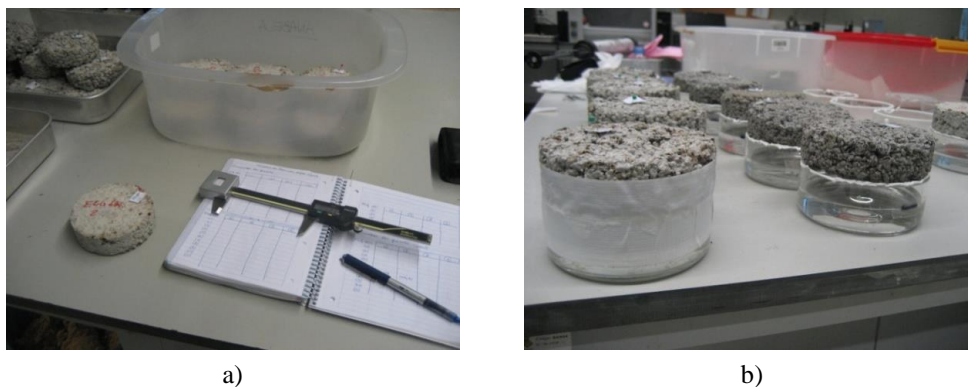


Figura 3.13 - Preparação de provetes para o ensaio de permeabilidade ao vapor de água, de acordo com o método das tinas: a) Provetes após a desmoldagem; b) Selagem dos provetes.

3.4.1.2 Resultados dos Ensaio

Como foi referido, é a partir do registo periódico das pesagens que é possível determinar o fluxo de difusão de vapor de água, Δm_{12} (kg/s), através da expressão (3.3). Considerou-se que se atingiu o ponto de equilíbrio quando se verificou variação linear das massas relativamente ao tempo, em cinco pesagens consecutivas sendo, desta forma, possível determinar os parâmetros relacionados com a difusão de vapor de água através do material de ensaio, representadas através das expressões (3.5) a (3.8): permeância à difusão de vapor de água, W (kg/(m².s.Pa)), e resistência à difusão de vapor de água, Z ((m².s.Pa)/kg), coeficiente de permeabilidade ao vapor de água, δ (kg/(m.s.Pa)), e factor de resistência ao vapor de água μ (-). A densidade do fluxo de difusão de vapor de água, g [kg/(s.m²)] é calculada a partir da área de exposição do provete, A (m²), e do declive da recta definida através do fluxo de difusão de vapor de água depois de estabelecida a corrente estacionária de difusão, G (kg/s), como definido através da expressão (3.4). Seguidamente, apresentam-se os resultados realizados nas betonilhas com ECG (M150, M250 e M400) e nas betonilhas de referência (R150, R250 e R400), nas argamassas (BetRef, BetCort, BetArgExp e BetEPS) e nos betões estruturais leves BE25, BE30 e BE40.

3.4.1.2.1 Betonilhas com ECG (M150, M250 e M400) e Betonilhas de Referência (R150, R250 e R400)

Método da Tina Seca

Nas Tabelas 3.5 e 3.6, apresentam-se os resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor de água das betonilhas M150, M250 e M400. Os resultados das betonilhas de referência, R150, R250 e R400, são apresentados na Tabelas 3.7 e 3.8.

Através da análise dos resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor de água, segundo o método da tina seca, é possível afirmar que, no caso das betonilhas leves com ECG, a betonilha M150 apresenta o maior coeficiente de permeabilidade ao vapor de água, δ (=14.43 kg/(m.s.Pa)), enquanto o menor valor é exibido pela betonilha fabricada com a maior quantidade de cimento por metro cúbico, M400, com δ =9.74 kg/(m.s.Pa)).

Tabela 3.5 - Método da tina seca: resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água das betonilhas com ECG, M150, M250 e M400.

Amostra	Provete	A (m ²) [×10 ⁻³]	G (kg/s) [×10 ⁻⁹]	g=G/A (kg/(s.m ²)) [×10 ⁻⁷]
M150	1	8.25	4.62	5.60
	2	8.35	4.55	5.45
	3	8.21	4.51	5.50
	4	8.28	4.51	5.45
	5	8.22	4.90	5.96
M250	1	8.26	4.27	5.17
	2	8.27	4.06	4.91
	3	8.28	4.03	4.86
	4	8.18	4.17	5.10
	5	8.21	3.33	4.06
M400	1	8.23	2.92	3.54
	2	8.21	2.81	3.43
	3	8.26	2.92	3.53
	4	8.33	3.19	3.84
	5	8.44	3.47	4.11

Tabela 3.6 - Método da tina seca: valores médios obtidos para a permeância (W) e resistência (Z) à difusão de vapor de água, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (δ) e factor de resistência ao vapor de água (μ), das betonilhas de referência, M150, M250 e M400.

Amostra	W (kg/(m ² .s.Pa)) [×10 ⁻¹⁰]	Z (m ² .s.Pa/kg) [×10 ⁺⁹]	δ (kg/(m.s.Pa)) [×10 ⁻¹²]	μ (-)
M150	4.63	2.16	14.43	13.65
M250	3.99	2.52	12.52	15.84
M400	3.06	3.29	9.74	20.30

Tabela 3.7 - Método da tina seca: resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água das betonilhas de referência, R150, R250 e R400.

Amostra	Provete	A (m ²) [×10 ⁻³]	G (kg/s) [×10 ⁻⁹]	g=G/A (kg/(s.m ²)) [×10 ⁻⁷]
R150	1	8.21	3.68	4.48
	2	8.22	4.51	5.49
	3	8.23	3.89	4.72
	4	8.21	3.68	4.49
	5	8.21	3.68	4.48
R250	1	8.19	3.58	4.37
	2	8.22	2.92	3.55
	3	8.22	4.17	5.07
	4	8.22	2.85	3.46
	5	8.23	2.99	3.63
R400	1	8.20	3.09	3.77
	2	8.26	2.99	3.61
	3	8.19	3.82	4.66
	4	8.27	2.99	3.61
	5	8.26	2.99	3.62

Tabela 3.8 - Método da tina seca: valores médios obtidos para a permeância (W) e resistência (Z) à difusão de vapor de água, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (δ) e factor de resistência ao vapor de água (μ), das betonilhas de referência, R150, R250 e R400.

Amostra	W (kg/(m ² .s.Pa)) [$\times 10^{-10}$]	Z (m ² .s.Pa)/kg [$\times 10^9$]	δ (kg/(m.s.Pa)) [$\times 10^{-12}$]	μ (-)
R150	3.92	2.57	12.31	16.10
R250	3.33	3.07	10.44	19.21
R400	3.19	3.16	9.95	19.94

As betonilhas de referência, R150, R250 e R400, exibem um comportamento semelhante ao das betonilhas com ECG, relativamente à quantidade de cimento por metro cúbico, *i.e.*, quanto menor for a dosagem de cimento, tanto maior é o valor do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água, δ . A betonilha com a menor dosagem de cimento, R150, apresenta o maior valor de δ (=12.31kg/(m.s.Pa)), enquanto o menor valor corresponde à betonilha com a maior dosagem de cimento, R400, δ =9.95 kg/(m.s.Pa).

Método da Tina Húmida

Os resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor de água, segundo o método da tina húmida, referentes às betonilhas M150, M250 e M400, são expostos nas Tabelas 3.9 e 3.10. Nas Tabelas 3.11 e 3.12 apresentam-se os resultados dos mesmos ensaios realizados nas betonilhas de referência, R150, R250 e R400.

A análise dos resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor de água das betonilhas com ECG, segundo o método da tina húmida, revelam que a betonilha com a menor quantidade de cimento, M150, apresenta o maior valor do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água, δ (=40.64kg/(m.s.Pa)), correspondendo o menor valor de δ à betonilha com a maior dosagem de cimento, M400, com δ =21.40 kg/(m.s.Pa)).

Os resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor de água, segundo o método da tina húmida, indicam que, tal como os resultados anteriores, à medida que se aumenta a quantidade de cimento, diminui o valor do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água, δ . No caso das betonilhas de referência, a betonilha com a menor dosagem de cimento, R150, apresenta o maior valor de δ (=28.76kg/(m.s.Pa)), enquanto o menor valor corresponde à betonilha com a maior dosagem de cimento, R400, δ =18.52 kg/(m.s.Pa)).

Tabela 3.9 - Método da tina húmida: resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água das betonilhas com ECG, M150, M250 e M400.

Amostra	Provete	A (m ²) [×10 ⁻³]	G (kg/s) [×10 ⁻⁹]	g=G/A (kg/(s.m ²)) [×10 ⁻⁷]
M150	1	8.25	14.06	17.04
	2	8.20	13.99	17.07
	3	8.18	14.10	17.24
	4	8.26	14.17	17.15
	5	8.24	14.17	17.20
M250	1	8.21	8.33	10.15
	2	8.25	8.37	10.15
	3	8.24	8.54	10.36
	4	8.28	9.17	11.07
	5	8.24	9.06	11.00
M400	1	8.26	8.06	9.75
	2	8.28	7.36	8.89
	3	8.24	7.64	9.27
	4	8.25	7.08	8.58
	5	8.15	7.08	8.69

Tabela 3.10 - Método da tina húmida: valores médios obtidos para a permeância (W) e resistência (Z) à difusão de vapor de água, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (δ) e factor de resistência ao vapor de água (μ), das betonilhas de referência, M150, M250 e M400.

Amostra	W (kg/(m ² .s.Pa)) [×10 ⁻¹⁰]	Z ((m ² .s.Pa)/kg) [×10 ⁺⁹]	δ (kg/(m.s.Pa)) [×10 ⁻¹²]	μ (-)
M150	12.85	0.78	40.64	4.84
M250	7.91	1.27	24.58	8.02
M400	6.78	1.48	21.40	9.24

Tabela 3.11 - Método da tina húmida: resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água das betonilhas de referência, R150, R250 e R400.

Amostra	Provete	A (m ²) [×10 ⁻³]	G (kg/s) [×10 ⁻⁹]	g=G/A (kg/(s.m ²)) [×10 ⁻⁷]
R150	1	8.22	11.11	13.52
	2	8.22	9.97	12.12
	3	8.23	9.86	11.98
	4	8.21	9.62	11.71
	5	8.22	9.62	11.70
R250	1	8.21	7.40	9.00
	2	8.21	6.53	7.95
	3	8.23	6.74	8.19
	4	8.22	6.87	8.36
	5	8.21	7.81	9.51
R400	1	8.20	7.08	8.64
	2	8.26	6.67	8.07
	3	8.26	6.11	7.40
	4	8.22	6.11	7.43
	5	8.23	6.11	7.43

Tabela 3.12 - Método da tina húmida: valores médios obtidos para a permeância (W) e resistência (Z) à difusão de vapor de água, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (δ) e factor de resistência ao vapor de água (μ), das betonilhas de referência, R150, R250 e R400.

Amostra	W (kg/(m ² .s.Pa)) [$\times 10^{-10}$]	Z (m ² .s.Pa/kg) [$\times 10^{+9}$]	δ (kg/(m.s.Pa)) [$\times 10^{-12}$]	μ (-)
R150	9.15	1.10	28.76	6.87
R250	6.45	1.56	20.59	9.59
R400	5.84	1.72	18.52	10.66

Interessa evidenciar que a diferença entre os valores de δ , dos métodos da tina seca e húmida, de M150 é significativamente mais elevado do que nas restantes betonilhas com ECG, M250 e M400, o que poderá ser explicado pelo facto da betonilha M150 ser mais heterogénea e menos coesa do que M250 e M400, com efeitos na deficiente selagem dos provetes às tinas e consequente aumento do fluxo de vapor.

3.4.1.2.2 Argamassas BetRef, BetCort, BetArgExp e BetEPS

Os resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor de água realizados nas argamassas BetRef, BetCort, BetArgExp e BetEPS (Figura 3.14) são apresentados nas Tabelas 3.13 e 3.14, para os procedimentos da tina seca e da tina húmida, respectivamente. Nestas tabelas, apenas se apresentam os valores finais de permeância (W) e resistência (Z) à difusão de vapor de água, do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (δ) e do factor de resistência ao vapor de água (μ), por serem estes os parâmetros que permitem caracterizar a permeabilidade ao vapor de água.



Figura 3.14 - Ensaio de permeabilidade ao vapor de água, de acordo com o método das tinas: a) Preparação dos provetes das argamassas BetArgExp; b) Provetes no interior da câmara climática.

Tabela 3.13 - Método da tina seca: valores médios obtidos para a permeância (W) e resistência (Z) à difusão de vapor de água, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (δ) e factor de resistência ao vapor de água (μ), das argamassas, BetRef, BetArgExp e BetEPS.

Amostra	W (kg/(m ² .s.Pa)) [$\times 10^{-10}$]	Z (m ² .s.Pa/kg) [$\times 10^{-9}$]	δ (kg/(m.s.Pa)) [$\times 10^{-12}$]	μ (-)
BetRef	3.35	3.00	10.49	18.91
BetCort	4.10	2.46	12.95	15.33
BetArgExp	3.22	3.24	10.14	20.33
BetEPS	4.89	2.05	15.44	12.82

Tabela 3.14 - Método da tina húmida: valores médios obtidos para a permeância (W) e resistência (Z) à difusão de vapor de água, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (δ) e factor de resistência ao vapor de água (μ), das argamassas, BetRef, BetArgExp e BetEPS.

Amostra	W (kg/(m ² .s.Pa)) [$\times 10^{-10}$]	Z (m ² .s.Pa/kg) [$\times 10^{-9}$]	δ (kg/(m.s.Pa)) [$\times 10^{-12}$]	μ (-)
BetRef	6.12	1.64	19.23	10.28
BetCort	6.39	1.57	19.85	9.99
BetArgExp	5.25	1.91	16.40	12.05
BetEPS	7.82	1.29	24.24	8.18

A análise dos resultados apresentados indica que a permeabilidade ao vapor de água apresenta valores maiores quando se usa o procedimento da tina húmida do que o da tina seca. A argamassa fabricada com grânulos de EPS, BetEPS, apresenta a maior permeabilidade ao vapor de água. A argamassa com agregados de argila expandida, BetArgExp, apresenta a menor permeabilidade ao vapor de água. A permeabilidade ao vapor de água da argamassa BetCort (com $\delta=12.95$ kg/[m.s.Pa] e $\delta=19.85$ kg/[m.s.Pa], respectivamente, nos métodos da tina seca e húmida), é superior à da argamassa BetRef (com $\delta=10.49$ kg/[m.s.Pa] no caso da tina seca, e $\delta=19.23$ kg/[m.s.Pa] no caso da tina húmida) e à da argamassa BetArgExp (com $\delta=10.14$ kg/[m.s.Pa] no caso da tina seca, e $\delta=16.40$ kg/[m.s.Pa] no caso da tina húmida). A permeabilidade ao vapor de água da argamassa BetCort é inferior à da argamassa BetEPS (com $\delta=15.44$ kg/[m.s.Pa], no caso da tina seca, e $\delta=24.24$ kg/[m.s.Pa], no caso da tina húmida), tanto no método da tina seca como no da tina húmida.

3.4.1.2.3 Betões estruturais leves BE25, BE30 e BE40

Os resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor de água realizados nos betões estruturais com ECG, BE25, BE30 e BE40 são apresentados nas Tabelas 3.15 e 3.16, para os procedimentos da tina seca e da tina húmida, respectivamente. Tal como no caso das argamassas, nestas tabelas, apenas se apresentam os valores finais de permeância (W) e resistência (Z) à difusão de vapor de água, do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água

(δ) e do factor de resistência ao vapor de água (μ), por serem estes os parâmetros que permitem caracterizar a permeabilidade ao vapor de água.

Tabela 3.15 - Método da tina seca: valores médios obtidos para a permeância (W) e resistência (Z) à difusão de vapor de água, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (δ) e factor de resistência ao vapor de água (μ), das argamassas, BetRef, BetArgExp e BetEPS.

Amostra	W (kg/(m ² .s.Pa)) [$\times 10^{-10}$]	Z (m ² .s.Pa/kg) [$\times 10^{+9}$]	δ (kg/(m.s.Pa)) [$\times 10^{-12}$]	μ (-)
BE25	8.69	11.59	5.36	37.07
BE30	1.06	9.56	6.54	30.57
BE40	1.17	8.65	7.24	27.69

Tabela 3.16 - Método da tina húmida: valores médios obtidos para a permeância (W) e resistência (Z) à difusão de vapor de água, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (δ) e factor de resistência ao vapor de água (μ), das argamassas, BetRef, BetArgExp e BetEPS.

Amostra	W (kg/(m ² .s.Pa)) [$\times 10^{-10}$]	Z (m ² .s.Pa/kg) [$\times 10^{+9}$]	δ (kg/(m.s.Pa)) [$\times 10^{-12}$]	μ (-)
BE25	9.95	11.24	6.08	36.38
BE30	1.30	7.86	7.95	25.38
BE40	1.55	6.50	9.47	20.99

Da análise dos resultados apresentados, é possível afirmar que os coeficientes de permeabilidade ao vapor de água são maiores no método da tina húmida do que no método da tina seca. O betão com a maior quantidade de ECG, BE40, é aquele que apresenta os maiores coeficientes de permeabilidade ao vapor de água. Ao betão com a menor quantidade de ECG, BE25, correspondem os menores valores dos coeficientes de permeabilidade ao vapor de água.

3.4.1.3 Síntese de Resultados

Os coeficientes de permeabilidade ao vapor de água apresentam valores mais elevados no procedimento da tina húmida, do que no procedimento da tina seca, o que está de acordo com o evidenciado noutros trabalhos [27], [44], [69].

As betonilhas com a menor dosagem de cimento, M150 e R150, revelam os maiores coeficientes de permeabilidade ao vapor de água e as betonilhas com a maior dosagem de cimento, M400 e R400, os menores valores. Destes resultados, depreende-se que o aumento da quantidade de cimento nas betonilhas provoca a diminuição da sua permeabilidade ao vapor de água.

A introdução de ECG na composição das betonilhas conduz ao aumento da sua permeabilidade ao vapor de água: os resultados revelaram que as betonilhas com ECG apresentam coeficientes de permeabilidade ao vapor de água superiores às correspondentes betonilhas de referência, *i.e.*, fabricadas apenas com agregados minerais.

No caso das argamassas, no método da tina seca, a argamassa BetArgExp é aquela cujo desempenho relativamente à permeabilidade ao vapor de água mais se assemelha à argamassa BetRef. No método da tina húmida, BetCort é a argamassa cujo desempenho relativamente à permeabilidade ao vapor de água mais se aproxima do da argamassa BetRef.

Quanto maior a quantidade de ECG incorporada na composição dos betões estruturais, maior é a sua permeabilidade ao vapor de água.

3.4.2 Absorção de Água por Imersão Parcial

No presente trabalho, avaliou-se experimentalmente a absorção de água dos materiais através do ensaio de absorção de água por imersão parcial. Os ensaios foram realizados de acordo com o previsto na norma EN ISO 15148:2002 [108]. Os materiais ensaiados foram as betonilhas com ECG (M150, M250 e M400) e as de referência (R150, R250 e R400) e os betões com ECG (BE25, BE30 e BE40).

3.4.2.1 Preparação de Provetes e Descrição do Método de Ensaio

As betonilhas foram fabricadas nas condições descritas nos Capítulo 2 e desmoldadas decorridas 48 horas após a sua produção. Neste trabalho, optou-se por fabricar provetes cilíndricos que, depois de desmoldados permaneceram, durante 28 dias, numa câmara de cura nas condições de temperatura e humidade relativa, definidas no Capítulo 2. Decorrido o tempo de cura, os provetes foram colocados numa sala climatizada a $T=23\pm 2^{\circ}\text{C}$ $HR=50\pm 5\%$, onde permaneceram até a sua massa ter estabilizado 0.1% relativamente à sua massa total, considerando 24 horas como período de referência para os intervalos de pesagem.

Os provetes foram lateralmente selados com uma película impermeável à água líquida e ao vapor de água (da marca comercial *Sika-Icosit K25*). Os provetes permaneceram a $T=23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $HR=50\pm 5\%$, o tempo necessário para a película, aplicada com o auxílio de uma pequena trincha, secar completamente.

Os cilindros foram colocados sobre um estrado de material plástico, dentro de um recipiente de água, de forma que o nível da água, relativamente ao fundo da base submersa do provete, fosse (5 ± 2) mm (Figura 3.15). De acordo com a norma EN ISO 15148:2002 [108], o

limite da água deve permanecer constante no decurso do ensaio.

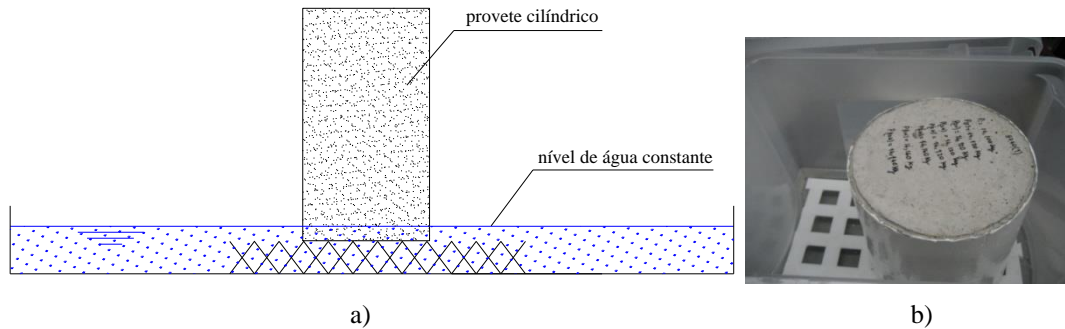


Figura 3.15 - Absorção de água por capilaridade; a) Esquemática do ensaio; b) Provete de betão no decurso do ensaio.

Antes de introduzir o provete dentro do tanque, foi realizada uma pesagem inicial. As pesagens seguintes foram realizadas aos 5 e 20 minutos, 1, 2, 4, 8, 10 e 23 horas. De acordo com a referida norma, antes de efectuar a pesagem, a superfície submersa deve ser limpa com uma esponja humedecida e as pesagens devem ser realizadas no menor espaço de tempo possível.

A variação da massa entre as pesagens consecutivas permite definir o gráfico através do qual se representa a variação da massa por área em função do tempo, de acordo com a expressão:

$$\Delta m_t = \frac{(m_t - m_i)}{A} \quad (3.9),$$

em que m_t (kg) corresponde à massa em cada pesagem, m_i (kg) à massa do provete no início do ensaio e A (m²) corresponde à área da base do provete em contacto com água. O tempo é expresso em \sqrt{t} . A equação da recta definida pelo conjunto de pontos $(\sqrt{t}, \Delta m_t)$, determinados durante o ensaio, permite calcular $\Delta m'_{tf}$ e $\Delta m'_0$. A ordenada correspondente à abcissa zero, define $\Delta m'_0$, enquanto $\Delta m'_{tf}$ é definida para o instante final do ensaio.

O coeficiente de absorção de água, A_w expresso em [kg/(m².s^{1/2})] é determinado através da seguinte expressão:

$$A_w = \frac{(\Delta m'_{tf} - \Delta m'_0)}{\sqrt{t}} \quad (3.10).$$

O betão foi moldado em moldes cilíndricos de 0.10 m de diâmetro e 0.12 m de altura, de acordo com o que é preconizado na referida norma. Para o caso de materiais heterogéneos contendo agregados na sua constituição, esta norma estabelece que o diâmetro (ou o lado) de um provete cilíndrico (ou prismático) deve ser no mínimo dez vezes a máxima dimensão do

agregado, que neste caso é 10 mm. Por outro lado, a espessura do provete, para os casos em estudo, deve estar compreendida entre 5 e 10 vezes a máxima dimensão do agregado. A mesma norma recomenda, para este caso, que o ensaio seja realizado com, pelo menos, três provetes.

3.4.2.2 Resultados dos Ensaio

3.4.2.2.1 Betonilhas com ECG (M150, M250 e M400) e Betonilhas de Referência (R150, R250 e R400)

Na Tabela 3.17, apresentam-se os valores dos coeficientes de absorção de água, A_w , das betonilhas com ECG, M150, M250 e M400 e das betonilhas de referência, R150, R250 e R400.

Tabela 3.17 - Coeficientes de absorção de água por imersão parcial, A_w , das betonilhas com ECG, M150, M250 e M400 e das betonilhas de referência, R150, R250 e R400, de acordo com a norma EN ISO 15148:2002 [108].

Amostra	A_w ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$)
M150	0.1144
M250	0.1060
M400	0.0483
R150	0.0513
R250	0.0450
R400	0.0267

A análise dos resultados das betonilhas com ECG revela que a betonilha com a menor quantidade de cimento por metro cúbico de argamassa, M150, apresenta o maior coeficiente de absorção, ou seja, $A_w=0.1144 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ e a betonilha com a maior dosagem de cimento, o menor valor, *i. e.*, $A_w=0.0483 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$. As betonilhas de referência apresentam um comportamento semelhante, no entanto, os coeficientes de absorção de água são menores: $A_w=0.0513 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ para a betonilha R150 e $A_w=0.0267 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ no caso da betonilha R400.

3.4.2.2.2 Betões com ECG, BE25, BE30 e BE40

Na Tabela 3.18, apresentam-se os coeficientes de absorção de água, A_w [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$], resultantes dos ensaios de absorção de água por imersão parcial dos betões estruturais com ECG (BE25, BE30 e BE40).

Tabela 3.18 - Coeficientes de absorção de água por imersão parcial, A_w , de betões estruturais com ECG, BE25, BE30 e BE40, de acordo com a norma EN ISO 15148:2002 [108].

Amostra	A_w ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$)
BE25	0.0056
BE30	0.0088
BE40	0.0093

Através da análise dos valores dos coeficientes de absorção, A_w , verifica-se que o menor valor corresponde ao betão com 25% de ECG, BE25, com $A_w=0.0056 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ e o maior valor ao betão com 40% de ECG, BE40, com $A_w=0.0093 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$. Desta forma, pode-se afirmar que, quanto maior a quantidade de ECG, tanto maior é o coeficiente de absorção de água, A_w .

3.4.2.3 Síntese de Resultados

Os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão parcial permitem afirmar que as betonilhas fabricadas com ECG revelam, relativamente às correspondentes betonilhas de referência, maiores coeficientes de absorção de água.

O coeficiente de absorção de água aumenta à medida que se reduz a quantidade de cimento, nas betonilhas com ECG e nas betonilhas de referência.

Nos betões com ECG, verificou-se que quanto maior for a quantidade de ECG, tanto maior é o coeficiente de absorção de água.

Como se acabou de reportar, a introdução de ECG tem como efeito o aumento da absorção de água dos materiais estudados.

3.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Na secção 3.2, determinou-se experimentalmente o coeficiente de condutibilidade térmica de três betonilhas fabricadas com areia e ECG e de três betonilhas fabricadas apenas com areia (betonilhas de referência). As betonilhas com ECG e as betonilhas com areia contêm idênticas dosagens de cimento. Foram igualmente avaliadas as condutibilidades térmicas de quatro argamassas fabricadas com areia e introdutor de ar, com ECG, com agregados de argila expandida e com areia e EPS. Os ensaios foram realizados com o recurso a um equipamento cujo princípio de funcionamento se baseia no método das placas quentes (*guarded hot plate method*). Os resultados dos ensaios revelaram que a utilização de ECG nas betonilhas permite reduzir a sua condutibilidade térmica e que esta aumenta à medida que se aumenta a quantidade

de cimento na sua composição. Os resultados dos ensaios das argamassas indicaram que argamassa que incorpora ECG é aquela que apresenta a menor condutibilidade térmica. Desta forma, demonstrou-se que a incorporação de ECG, provenientes da indústria corticeira, no fabrico das betonilhas, permite reduzir a condutibilidade térmica dos materiais estudados.

A caracterização do perfil higrotérmico das betonilhas fabricadas com ECG, M150, M250 e M400, foi complementada com a determinação experimental das curvas de adsorção e com a avaliação da permeabilidade ao vapor de água e da absorção de água por imersão parcial. No sentido de avaliar a higroscopicidade de ECG, determinou-se também a curva de adsorção de uma mistura solta de ECG, com granulometria e composição idênticas à incorporada nas betonilhas. Definiram-se ainda as curvas higroscópicas, de adsorção e de desadsorção, de quatro argamassas e de seis betões e as curvas de retenção das mesmas argamassas e de três betões fabricados com quantidades variáveis de ECG.

Na secção 3.3 avaliou-se a capacidade de retenção de água dos materiais, nos domínios higroscópico e super-higroscópico. Os resultados dos ensaios de higroscopicidade revelaram que a mistura solta de ECG (sem ligante) é menos higroscópica, quando comparada com as betonilhas que incorporam a mesma mistura de ECG. Constatou-se que a incorporação de ECG reduz ligeiramente a higroscopicidade das betonilhas e dos betões estudados, relativamente às composições que apenas integram agregados minerais. Verificou-se igualmente que as curvas higroscópicas dos materiais estudados apresentam a configuração do tipo II, de acordo com a classificação IUPAC [34] e que mantêm o comportamento de histerese, entre as fases de adsorção e de desadsorção, característico de materiais higroscópicos porosos.

Os ensaios realizados no domínio super-higroscópico, indiciam que o aumento da quantidade de ECG na composição dos betões, aumenta a sua capacidade de retenção de água.

A transferência de humidade foi avaliada, na secção 3.4, em termos da permeabilidade ao vapor de água e da absorção de água por imersão parcial dos materiais. Os ensaios de permeabilidade ao vapor de água foram realizados segundo o método da tina seca e da tina húmida. Os ensaios permitiram avaliar a permeabilidade ao vapor de água das betonilhas fabricadas com ECG (M150, M250 e M400) e das betonilhas de referência (R150, R250 e R400). A análise e a comparação dos correspondentes resultados permitem afirmar que os coeficientes de permeabilidade ao vapor de água apresentam maiores valores no método da tina húmida do que no método da tina seca e o aumento do teor de cimento na composição das betonilhas tem como efeito a diminuição da sua permeabilidade ao vapor de água. Apurou-se igualmente que a incorporação de ECG na composição das betonilhas se repercute no aumento da sua permeabilidade ao vapor de água, tanto em ambientes secos como em ambientes

húmidos, relativamente às betonilhas fabricadas apenas com agregados minerais (betonilhas de referência). Apresentaram-se, ainda, os resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor de água das argamassas BetRef, BetCort, BetArgExp e BetEPS, e dos betões estruturais leves BE25, BE30 e BE40. À semelhança do evidenciado nos ensaios realizados nas betonilhas fabricadas com ECG e nas correspondentes betonilhas de referência, os coeficientes de permeabilidade ao vapor de água apresentam valores mais elevados no ambiente húmido do que no seco. Os coeficientes de permeabilidade ao vapor de água destas argamassas e destes betões revelam que a argamassa BetArgExp é aquela cujo desempenho, relativamente à permeabilidade ao vapor de água, mais se aproxima da argamassa BetRef, no ambiente seco, enquanto no ambiente húmido é a argamassa BetCort cuja permeabilidade ao vapor de água mais se assemelha à da argamassa BetRef. Foi, ainda, possível constatar que, quanto maior for a quantidade de ECG incorporada na composição dos betões estruturais, maior é a sua permeabilidade ao vapor de água.

Os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão parcial realizados com as betonilhas M150, M250, M400, R150, R250 e R400 e com os betões estruturais leves BE25, BE30 e BE40 demonstraram que a introdução de ECG tem como efeito o aumento dos valores dos coeficientes de absorção de água das betonilhas e dos betões estudados. No caso das betonilhas, quanto maior for a quantidade de cimento na sua composição, menor é a absorção de água.

3.6 ANEXO

Tabela 3. 19 - Composição da argamassa BetRef [104].

BetRef	Cimento (kg/m ³)	317.8
	Areia (kg/m ³)	1561.8
	Água (l/m ³)	158.9
	Introduç. de ar (l/m ³)	2.2

Tabela 3. 20 - Composição da argamassa BetCort [104].

BetCort	Cimento (kg/m ³)	341.9
	Areia (kg/m ³)	1561.8
	ECG 3/5 (kg/m ³)	171.0
	ECG 5/10 (kg/m ³)	25.8
	Água (l/m ³)	79.6

Tabela 3. 21 - Composição da argamassa BetArgExp [104].

BetArgExp	Cimento (kg/m ³)	337.6
	Granul. 2/4 (kg/m ³)	130.2
	Granul. 3/8 (kg/m ³)	293.0
	Água (l/m ³)	168.8

Tabela 3. 22 - Composição da argamassa BetEPS [104].

BetEPS	Cimento (kg/m ³)	337.8
	Areia (kg/m ³)	415.0
	Grânulos EPS (kg/m ³)	12.1
	Água (l/m ³)	168.9

Tabela 3. 23 - Composição do betão de referência, BR [104].

BR	Cimento (kg/m ³)	380.00
	Brita (kg/m ³)	1372.00
	Areia (kg/m ³)	457.00
	Água (l/m ³)	190.00

Tabela 3. 24 - Composição do betão com introdutor de ar, BAR [104].

BAR	Cimento (kg/m ³)	380.00
	Brita (kg/m ³)	1372.00
	Areia (kg/m ³)	457.00
	Introdutor de ar (l/m ³)	0.36
	Água (l/m ³)	190.00

Tabela 3. 25 - Composição do betão com ECG, BE20 [104].

BE20	Cimento (kg/m ³)	380.00
	Brita (kg/m ³)	1372.00
	Areia (kg/m ³)	365.60
	ECG 1/2 (kg/m ³)	2.13
	ECG 05/1 (kg/m ³)	7.37
	Água (l/m ³)	190.00

Tabela 3. 26 - Composição do betão com ECG, BE25 [104].

BE25	Cimento (kg/m ³)	380.00
	Brita (kg/m ³)	1372.00
	Areia (kg/m ³)	342.80
	ECG 1/2 (kg/m ³)	2.66
	ECG 05/1 (kg/m ³)	9.21
	Água (l/m ³)	190.00

Tabela 3. 27 - Composição do betão com ECG, BE30 [104].

BE30	Cimento (kg/m ³)	380.00
	Brita (kg/m ³)	1372.00
	Areia (kg/m ³)	319.90
	ECG 1/2 (kg/m ³)	3.20
	ECG 05/1 (kg/m ³)	11.05
	Água (l/m ³)	190.00

Tabela 3. 28 - Composição do betão com ECG, BE40 [104].

BE40	Cimento (kg/m ³)	380.00
	Brita (kg/m ³)	1372.00
	Areia (kg/m ³)	274.30
	ECG 1/2 (kg/m ³)	4.26
	ECG 05/1 (kg/m ³)	14.74
	Água (l/m ³)	190.00

3.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ajibola, K.; Onabanjo, B. 1995. Investigation of cocos nucifera as a potential insulator for buildings. *Renewable Energy*. Vol. 6 (N.1), pp. 81-84.
- [2] Bouguerra, A.; Ledhem, A.; Barquin, F.; Dheilly, R. M.; Quéneudec, M. 1998. Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement and wood aggregates. *Cement and Concrete Research*. Vol. 28 (8), pp. 1179–1190.
- [3] Khedari, Joseph; Suttisonk, Borisut; Pratinthong, Naris; Hirunlabh, Jongjit. 2001. New lightweight composite construction with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 23, pp. 65-70.

- [4] Gonçalves, M. R. F.; Bergmann, C. P. 2007. Thermal insulators made with rice husk ashes: Production and correlation between properties and microstructure. *Construction and Building Materials*. Vol. 21, pp. 2059-2065.
- [5] Benazzouk, A.; Douzane, O.; Mezreb, K.; Laidoudi, B.; Quéneudec, M. 2008. Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles. Experimental study and modelling. *Construction and Building Materials*. Vol. 22, pp. 573-579.
- [6] Mounanga, P.; Gbongbon, W.; Poullain, P.; Turcry, P. 2008. Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 30, pp. 806-814.
- [7] Roma Jr., Luiz C.; Martello, Luciane S.; Sava, Holmer. 2008. Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers. *Construction and Building Materials*. Vol. 22, pp. 668-674.
- [8] Karade, S. R. 2010. Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. *Construction and Building Materials*. Vol. 24, pp. 1323-1330.
- [9] Al Rim, K.; Ledhem, A.; Douzane, O.; Dheil, R. M. 1999. Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 21, pp. 269-276.
- [10] Demirboga (a), Ramazan and Gül, Rügen. 2003. Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures. *Energy and Buildings*. Vol. 35, pp. 1155-1159.
- [11] Uysal, Habib; Demirboğa, Ramazan; Şahin, Remzi; Gül, Rügen. 2004. The effects of different cement dosages, slump and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete. *Cement and Concrete Reserach*. Vol. 34, pp. 845-848.
- [12] Simões (a), I.; Simões, N.; Tadeu, A. 2012. Thermal delay simulation in multilayer systems using analytical solutions. *Energy and Buildings*. Vol. 49, pp. 631–639.
- [13] Carlaw, H. S. e Jaeger, J. C. 1959. *Conduction of heat in solids*. Oxford. Claredon Press.
- [14] Kim, Kook-Han; Jeong, Sang-Eun; Yang, Jin-Keun; Yang, Sungchul. 2003. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 33, pp. 363-371.
- [15] Černý, R., *et al.* 2000. The effect of compressive stress on thermal and hygric properties of Portland cement mortar in wide temperature and moisture ranges. *Cement and Concrete Research*. Vol. 30, pp. 1267-1276.
- [16] Khan, M. I. 2002. Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models. *Building and Environment*. Vol. 37, pp. 607-614.

- [17] André, S.; Rémy, B.; Pereira, F. R.; Cella, N. 2003. Hot wire method for the thermal characterization of materials: Inverso problem application. *Engenharia Térmica*. Vol. 4, pp. 55-64.
- [18] Wong, J. M., Glasser, F. P.; Imbabi, M. S. 2007. Evaluation of thermal conductivity in air permeable concrete for dynamic breathing wall construction. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 29, pp. 647-655.
- [19] Černý, R., *et al.* 2003. Thermal and hygric properties of Portland cement mortar after high-temperature exposure combined with compressive stress. *Cement and Concrete Research*. Vol. 33, pp. 1347-1355.
- [20] Mňahončaková, E.; Jiříčková, M.; Pavlík, Z.; Fiala, L.; Rovnaníková, P.; Bayer, P.; Černý, R. 2006. Effect of Moisture on the thermal conductivity of a cimentitious composite. *International Journal of Thermophysics*. Vol. 27 (No.4), pp. 1228-1239.
- [21] Vejmelková, Eva; Pavlíková, Milena; Kersner, Zbynek; Rovnaníková, Pavla; Ondráček, Michal; Sedlmaier, Martin; Cerny, Robert. 2009. High performance concrete containing lower slag amount: A complex view of mechanical and durability properties. *Construction and Building Materials*. Vol. 23, pp. 2237-2245.
- [22] Jeong, Young-Sun; Choi, Hyun-Joung; Kim, Kyoung-Woo; Choi, Gyoung-Seok; Kang, Jae-Sik; Yang, Kwan-Seop. 2009. A study on the thermal conductivity of resilient materials. *Thermochimica Acta*. Vol. 490, pp. 47-50.
- [23] Othman, Ali M. 2010. Experimental investigations of the effect of some insulating materials on the compressive strength, Water absorption and thermal conductivity of building bricks. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. Vol. 4 (No.4), pp. 443-450.
- [24] Norma, ISO 8301. 1991. *Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - heat flow meter apparatus*. ISO.
- [25] Salmon, David. 2001. Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developments and sources of reference materials *Measurement Science and Technology*. Vol. 12, pp. R89-R98.
- [26] Flynn, D. R., Healy, W. M. and Zarr, R. R. 2005. High-temperature guarded hot plate apparatus control of edge heat loss. *International Thermal Conductivity 28th Conference/International Thermal Expansion 16th Symposium Proceedings*, pp. 208-223.
- [27] Torres, Isabel. 2004. *Humidade ascensional em paredes de construções históricas* - Tese de Doutoramento. Coimbra. FCT-UC.
- [28] Asdrubali, F.; Baldinelli, G.; Bianchi, F.; Libbra, A.; Muscio, A. 2010. Comparative analysis of different methods to evaluate the thermal conductivity of homogenous

- materials. *UIT 2010 Conference on Thermal and Environmental Issues in Energy Systems*. Sorrento, Italy, 16-19 May. ASME-ATI.
- [29] Krus, Martin. 1996. *Moisture transport and storage coefficients of porous mineral building materials - Theoretical principles and new test methods* - Doctoral Thesis. Fraunhofer-Institut für Bauphysik. Stuttgart, Germany.
- [30] Hall, Matthew; Allinson, David. 2009. Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. *Building and Environment*. Vol. 44, pp. 1935-1942.
- [31] Krus, M. e Kiessl, K. 1998. Determination of the moisture storage characteristics of porous capillary active materials. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. Vol. 31, pp. 522-529.
- [32] Janz, Mårten. 2001. Techniques for measuring moisture storage capacity at high levels. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 13 (No.5) Sep./October, pp. 364-370.
- [33] Janz, Mårten and Johannesson, Björn F. 2001. Measurements of the moisture storage capacity using sorption balance and pressure extractors. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 24, pp. 316-334.
- [34] IUPAC, International Union of Pure and Applied Chemistry. 1985. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure and Appl. Chem*. Vol. 57 (4), pp. 603-619.
- [35] Hans, Kurt K. 1986. Sorption isotherms - A report. Denmark: The Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering - Material Laboratory. *Technical Report 162/86* December.
- [36] Künzle, Hartwing M. 1995. *Simultaneous heat and moisture transport in building components* - Doctoral Thesis. Stuttgart, Fraunhofer-Institut für Bauphysik.
- [37] Norma, EN ISO12571:2000. Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of hygroscopic sorption properties. CEN-ISO.
- [38] Tada, Shinsaku. 1998. An Overview of principles and techniques of moisture properties. *Workshop on Mass Energy Transfer and Deterioration of Building Materials and Components*. Tsukuba, Japan, 22-23 January.
- [39] Arfvidsson, Jesper; Cunningham, Malcolm. 2000. A transient technique for determining diffusin coefficients in higroscopic materials. *Building and Environment*. Vol. 35, pp. 239-249.
- [40] Peuhkuri, Ruut. 2003. *Moisture dynamics in building envelopes* - PhD Thesis. Departement of Civil Engineering, Technical University of Denmark.
- [41] Johansson, Peter. 2005. *Water absorption in two-layer masonry systems - Properties, profiles and predictions* - Doctoral Thesis.. Lund Institute of Technology, Division of Building Materials. Lund, Swede.

- [42] Åhs, Magnus Sören. 2008. Sorption scanning curves for hardened cementitious materials. *Construction and Building Materials*. Vol. 22, pp. 2228-2234.
- [43] Anderberg, Anders. 2007. Studies of moisture and alkalinity in self-leveling flooring compounds - Doctoral Dissertation. Lund Institute of Technology, Division of Building Materials. Lund, Swede.
- [44] Goual, M. S.; Bali, A.; DeBarquin, F.; Dheilily, R. M.; Quéneudec, M. 2006. Isothermal moisture properties of clayey cellular concretes elaborated from clayey waste, cement and aluminium powder. *Cement and Concrete Research*. Vol. 36, pp. 1768-1776.
- [45] Kumaran, K.; Lackey, J.; Normandin, N.; Van Reenen, D.; Tariku, F. 2004. Heat, air and moisture transport properties of several North American bricks and mortar mixes. *Journal of Testing and Evaluation*. Vol. 32 (No.5) September, pp. 383-389.
- [46] Collet, Florence, *et al.* 2008. Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials. *Construction and Building Materials*. Vol. 22, pp. 1271-1280.
- [47] Goossens, E. L. J. 2003. The moisture transfer properties of coated gypsum - PhD Thesis. Eindhoven University of Technology. Eindhoven, The Netherlands.
- [48] Poyet, Stéphane. 2009. Experimental investigation of the effect of of temperature on the first desorption isotherm of concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 39, pp. 1052-1059.
- [49] Baroghel-Bouny (a), Veronique. 2007. Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials. Part I: Essential tool for analysis of hygral behaviour and its relation to pore structure. *Cement and Concrete Research*. Vol. 37, pp. 414-437.
- [50] Ishida, Tetsuya, Maekawa, Koichi; Kishi, Toshiharu. 2007. Enhanced modelling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history. *Cement and Concrete Research*. Vol. 37, pp. 565-578.
- [51] Fagerlund, G. 1973. Determination of pore size distribution by suction porosimetry. *Materials and Structures*. Vol. 6 (No.3), pp. 191-201.
- [52] Carmeliet, Jan; Roels, Staf. 2001. Determination of the isothermal moisture transport properties of porous building materials. *Journal of Thermal Env. & Building Science*. Vol. 24, pp. 183-210.
- [53] Pavlík, Zbysěk; Michálek, Petr; Pavlíková, Milena; Maxová, Ivana; Černý, Robert. 2008. Water and salt transport and storage properties of Mšené sandstone. *Construction and Building Materials*. Vol. 22, pp. 1736-1748.
- [54] Martys, Nicos S.; Ferraris, Chiara F. 1997. Capillary transport in mortars and concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 27 (No.5), pp. 747-760.
- [55] Alvarez, J. C. 1998. Evaluation of moisture diffusion theory in porous materials - Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial

- fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Mech. Engineering. Blackburg, Virginia.
- [56] Goual, M. S.; DeBarquin, F.; Benmalek, M. L.; Bali, A.; Quéneudec, M.. 2000. Estimation of the capillary transport coefficient of clayey aerated concrete using a gravimetric technique. *Cement and Concrete Research*. Vol. 30, pp. 1559-1563.
- [57] Basheer, Lulu, Kropp, Joerg e Cleland, David J. 2001. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties - A review. *Construction and Building Materials*. Vol. 15, pp. 93-103.
- [58] Hanžič, L.; Ilić, R. 2003. Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 33, pp. 1385-1388.
- [59] Evangelista, L.; De Brito, J. 2010. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 32, pp. 9-14.
- [60] Hanžič, Lucija, Kosec, Ladislav; Anžel, Ivan. 2010. Capillary absorption in concrete and the Lucas-Washburn equation. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 32, pp. 84-91.
- [61] Janssen, Hans. 2010. Thermal diffusion of water vapour in porous materials: Fact or fiction? *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 54, pp. 1548-1562.
- [62] Castro, Javier, Bentz, Dale; Weiss, Jason. 2011. Effect of sample conditioning on the water absorption of concrete. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 33, pp. 805-813.
- [63] Derluyn, Hannelore, Janssen, Hans e Carmeliet, Jan. 2011. Influence of the nature of interfaces on the capillary transport in layered materials. *Construction and Building Materials*. Vol. 25, pp. 3685-3693.
- [64] Narayanan, N.; Ramamurthy, K. 2000. Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement & Concrete Research*. Vol. 22, pp. 321-329.
- [65] Černý, R., Hošková, Š.; Toman, J. 1995. A transient method for measuring the water vapour diffusion in porous building materials. *Proceedings of International Symposium on Moisture Problems in Building Walls*. University of Porto, Portugal: pp. 137-146.
- [66] Söderström, Ove. 1997-1998. On analysis of cup method measurements on hygroscopic materials with surface coatings. *Nordic Journal of Building Physics*. Vol. I.
- [67] Rivas, T., Prieto, B.; Silva, B. 2001. Permeability to water vapour in granitic rocks. Application to the study of deleterious effects of conservation treatments. *Building and Environment*. Vol. 36, pp. 239-246.
- [68] Vinha, J.; Mikkil, A.; Valovirta, I.; Lindberg, R. 2002. Water vapour resistance of materials as a function of humidity. *Building Physics – 6th Nordic Symposium, Session 12: Hygrothermal Properties of Materials*. Trondheim, Norway. 17-19 June. pp. 501-508.

- [69] Jiříčková, Milena; Černý, Robert. 2006. Effect of hydrophilic admixtures on moisture and heat transport and storage parameters of mineral wool. *Construction and Building Materials*. Vol. 20, pp. 425-434.
- [70] Lafhaj, Zoubier; Guillaume, Richard; Kaczmarek, Mariusz; Skoczylas, Frederic. 2006. Experimental determination of intrinsic permeability of limestone and concrete: comparison between in situ and laboratory results. *Building and Environment*. Vol. 42 (8), pp. 3042-3050.
- [71] Berndt, M. L. 2009. Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*. Vol. 23, pp. 2606-2613.
- [72] Kearsley, E.P.; Wainwright, P. J. 2001. Porosity and permeability of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 31 (5), pp. 805-812.
- [73] Banthia, N., Biparva, A.; Mindess, S. 2005. Permeability of concrete under stress. *Cement and Concrete Research*. Vol. 35, pp. 1651 - 1655.
- [74] Mosquera, M.J.; Silva, T. B.; Prieto, B.; Ruiz-Herrera, E. 2006. Addition of cement to lime-based mortars: Effect on pore structure and vapor transport. *Cement and Concrete Research*. Vol. 36, pp. 1635 - 1642.
- [75] Baroghel-Bouny (b), Véronique. 2007. Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials. Part II: Essential tool assessment of transport properties and for durability prediction. *Cement and Concrete Research*. Vol. 37, pp. 438-454.
- [76] Mňahončáková, Eva; Pavlíková, Milena; Stefania, Grzeszczyk; Rovnaníková, Pavla; Černý, Robert. 2008. Hydric, thermal and mechanical properties of self-compacting concrete containing different fillers. *Construction Building Materials*. Vol. 22, pp. 1594-1600.
- [77] Noumowe, Albert N., Siddique, Rafat; Debicki, G. 2009. Permeability of high-performance concrete subjected to elevated temperature (600°C). *Construction and Building Materials*. Vol. 23, pp. 1855-1861.
- [78] Norma, EN ISO 12572:2001. Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties. CEN-ISO.
- [79] Tesarék, Pavel; Drchalová; Jaroslava; Kolísko, Jirí; Rovnaníková, Pavla; Cerny, R. 2007. Flue gas desulfurization gypsum: Study of basic mechanical, hydric and thermal properties. *Construction Building Materials*. Vol. 21, pp. 1500-1509.
- [80] Gudmundsson, Kjartan. 2002. Tracer gas measurements of water vapour permeability. *Building Physics – 6th Nordic Symposium, Session 9: Moisture Properties – Experimental Methods*. Trodheim, Norway, pp. 405-412.
- [81] Nambiar, E. K. Kunhanandan e Ramamurthy, K. 2007. Sorption characteristics of foam concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 37, pp. 1341-1347.

- [82] Pel, L., Kopinga, K.; Brocken, H. 1996. Moisture transport in porous building materials. *Heron*. Vol. 41 (No.2).
- [83] Rucker, P., Holm, A.; Krus, M. 2000. Determination of moisture and salt content distributions by combining NMR and gamma ray measurements. *Materials week*. Munich, Germany.
- [84] Marfisi, Emanuele; Burgoyne, Chris. 2007. *Magnetic Resonance Imaging of Concrete with FRP reinforcement*. University of Patras, Greece, 16-18 July.
- [85] Kumaran, M. K.; Bomberg, M. A. 1985. Gamma-Spectrometer for determination of density distribution and moisture distribution in building materials. *Proceedings of the International Symposium on Moisture and Humidity*. Washington DC, 15-18 April, pp. 445-490.
- [86] Roels, S.; Carmeliet, J. 2006. Analysis of moisture flow in porous materials using microfocus X-ray radiography. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 49, pp. 4762-4772.
- [87] Chatterji, S. 2004. An explanation for the unsaturated state of water stored concrete. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 26, pp. 75-79.
- [88] Gopalan, M. K. 1996. Sorptivity of fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 26 (No.8), pp. 1189-1197.
- [89] Quenard, D. A.; Xu, K.; Kunzel, H. M.; Bentz, D. P.; Martys, N. S. 1998. Microstructure and transport properties of porous building materials. *Materials and Structures/ Materiaux et Construction*. Vol. 31, pp. 317-324.
- [90] Kumaran, M. K. 1999. Moisture diffusivity of building materials from water absorption measurements. *Journal of Thermal Envelope & Building Science*. Vol. 22, pp. 349-355.
- [91] Ferreira, Rui Miguel; Jalali, Saíd. 2001. Avaliação dos Ensaios Correntes para a Medição da Durabilidade do Betão. *Engenharia Civil UM*. Vol. 12, pp. 41-54.
- [92] Coutinho, J. Sousa. 2003. The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 25, pp. 51-59.
- [93] Tsivilis, S.; Tsantilas, J.; Kakali, G.; Chaniotakis, E.; Sakellariou. 2003. The permeability of Portland limestone cement concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 33, pp. 1465-1417.
- [94] De Oliveira, Luiz Antonio Pereira, Gomes, João Paulo de Castro; Pereira, Cristiana Nadir Gonilho. 2006. Study of sorptivity of self-compacting concrete with mineral additives. *Journal of Civil Engineering and Management*. Vol. XII (No. 3), pp. 215-220.
- [95] Correia, J. R., De Brito, J.; Pereira, A. S. 2006. Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates. *Materials and Structures*. Vol. 39, pp. 169-177.

- [96] Kolias, S. e Georgiou, C. 2007. The effect of paste volume and water content on the strength and water absorption of concrete. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 27, pp. 211-216.
- [97] Ioannou, Ioannis, Hamilton, Andrea; Hall, Christopher. 2008. Capillary absorption of water and n-decane autoclaved aerated concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 38, pp. 766-771.
- [98] Roels, Staf, Semijin, Jurgen; Carmeliet, Jan. 2002. Modelling unsaturated moisture in autoclaved aerated concrete: a microstructural approach. *Building Physics: 6th Nordic Symposium*. Trodheim, Norway, pp. 167-174.
- [99] Zhus, Wenzhong; Bartos, P.J. M. 2003. Permeation properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 33, pp. 921-926.
- [100] Schießl, Peter; Wiegink, Karl-Heinz. 2004. Drying characteristics of calcium sulfate flow screeds. *Material Science*. Vol. 57 (No.12), pp. 78-85.
- [101] Silva, João, De Brito, Jorge; Veiga, Rosário. 2007. Avaliação do comportamento à água de argamassas com incorporação de agregados cerâmicos. *Engenharia Civil UM*. Vol. 28, pp. 37-45.
- [102] Norma, EN 1015-18. 2002. Methods of tests for mortars for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. CEN.
- [103] Künzl, Hartwing M., Holm, Andreas H.; Krus, Martin. 2008. Hygrothermal Properties and Behaviour of Concrete. *WTA-Almanach 2008*, pp. 161-181.
- [104] Costa, Maria de Lurdes Belgas. 2011. *Caracterização das propriedades físicas, mecânicas e térmicas de betões com incorporação de cortiça* - Tese de Doutoramento. FCT-UC.
- [105] Norma, ISO 12570:2000. Hygrothermal performance of building materials and products: Determination of moisture content by drying at elevated temperature. ISO.
- [106] Panesar, D. K.; Shindman, B. 2012. The mechanical transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 34, pp. 982-992.
- [107] Norma, NT481. 1997. Retention curve and pore size distribution - NordTest Method. NordTest.
- [108] Norma, EN ISO 15148. 2002. Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion. CEN-ISO.
- [109] De Vries, Daniel A. 1987. The theory of heat and moisture transfer in porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 30 (No.7), pp. 1343-1350.

- [110] Demirboga (b), Ramazan and Gül, Rüsten. 2003. The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 33, pp. 723-727.
- [111] Fick, A. E. 1855. Über Diffusion. Poggendorff's *Annalen der Physik und Chemie*. Vol. 94.
- [112] Incropera, Frank P.; DeWitt, David P. 2002. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 5th Edition. John Wiley & Sons.
- [113] Jalali, Said, Eires, Rute; Camões, Aires. 2005. *Experimental characterization of granulated cork lightweight concrete*. Minerals and Energy Economy Research Institute - Polish Academy of Sciences. Kraków, Poland. Edit. Zbigniew Wzorek, pp. 129-133.
- [114] Kreith, Frank. 1977. *Princípios da Transmissão de Calor* - tradução da 3ª edição americana. Edgar Blucher, Lda.
- [115] Langmuir, Irving. 1916. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I solids. *Journal of the American Society of Chemistry*. Vol. 38 (11), pp. 2221-2295.
- [116] Norma, ISO 8302:1991. Thermal insulation determination of steady-state thermal resistance and related properties - guarded hot plate apparatus. ISO.
- [117] Powers, T. C.; Brownyard, T. L. 1947. Studies of the physical properties of hardened cement paste. *Proc. J. Am. Concrete Ins.* pp. 43-262.
- [118] Powers, T. C. 1932. Studies of workability of concrete. *Journal of the American Concrete Institute*. Vol. 28 (No.2) Feb., pp. 419-448.

Capítulo 4

As Câmaras Acústicas Verticais do ITeCons

ÍNDICE

- 4.1. Introdução
- 4.2 Descrição das Câmaras Acústicas Verticais
 - 4.2.1 Câmara Vertical Fixa
 - 4.2.2 Câmara Vertical Móvel
 - 4.2.3 Equipamentos de Ensaio
- 4.3. Preparação e Caracterização das Câmaras Verticais
 - 4.3.1 Tempo de Reverberação, T_r
 - 4.3.2 Valor Máximo do Índice de Redução Sonora das Câmaras, $R'_{\text{máx}}$
 - 4.3.2.1 Pavimento do Tipo A
 - 4.3.2.2 Pavimento do Tipo C
- 4.4 Caracterização da Laje de Referência de Betão Armado (Laje do ITeCons)
 - 4.4.1 Isolamento Sonoro a Sons Aéreos
 - 4.4.2 Isolamento Sonoro a Sons de Percussão
 - 4.4.3 Factor de Perdas Total, η_{total}
- 4.5 Síntese do Capítulo
- 4.6 Referências Bibliográficas

4.1. INTRODUÇÃO

As câmaras acústicas integram o laboratório de acústica do Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (ITeCons) e foram projectadas e construídas simultaneamente com o edifício onde se encontram alojadas.

Nas câmaras acústicas é possível realizar ensaios de caracterização do desempenho ao isolamento sonoro a sons aéreos e a sons de percussão, bem como ensaios de absorção sonora de produtos e sistemas de construção, tais como paredes, pavimentos, envidraçados, janelas ou revestimentos de piso; materiais para o tratamento de paredes e tectos ou outros elementos construtivos adoptados no condicionamento acústico de espaços; ou, ainda, dispositivos de redução do ruído de tráfego rodoviário, tais como barreiras acústicas. Trata-se de dois conjuntos de câmaras acústicas do qual fazem parte duas câmaras adjacentes em planta - as câmaras horizontais, e duas câmaras alinhadas verticalmente - as câmaras verticais.

Nas câmaras horizontais, são realizados os ensaios de medição do isolamento sonoro a sons aéreos, de elementos de separação verticais, e os ensaios de avaliação da absorção sonora. Nas câmaras verticais, são realizados os ensaios de isolamento sonoro a sons aéreos e de percussão em elementos de separação/compartimentação horizontais, *i.e.* pavimentos ou revestimentos de piso. As câmaras acústicas do ITeCons têm a particularidade de serem móveis, possibilitando, desta forma, a construção dos provetes de ensaio num espaço exterior e anexo às instalações laboratoriais. Depois de construídos, e decorrido o tempo de condicionamento e/ou de estabilização e/ou de cura necessários, consoante as exigências/características dos materiais a ensaiar, os provetes são transportados através de uma ponte rolante e instalados no interior das câmaras na posição final de ensaio. À semelhança da construção dos provetes, a sua demolição/desmontagem também é realizada fora das câmaras acústicas. Deste modo, minimizam-se os danos nas instalações e reduzem-se substancialmente os seus tempos de ocupação.

A satisfação das recomendações definidas por estas normas foi estudada durante a fase de concepção do projecto. No entanto, verificou-se igualmente a necessidade de proceder à avaliação de outras especificações após a construção das câmaras acústicas. As exigências normativas que estas instalações laboratoriais devem respeitar são pormenorizadamente descritas na norma EN ISO 10140-5:2010 [1]. Adicionalmente, este documento normativo remete para o cumprimento de outros requisitos definidos nas seguintes normas¹:

¹ As normas referidas são as que vigoram à data de publicação desta dissertação, ainda que durante os trabalhos se tivessem utilizado as versões correspondentes que se encontravam em vigor à data de realização dos procedimentos descritos (e que são em tudo semelhantes aos das normas indicadas neste texto).

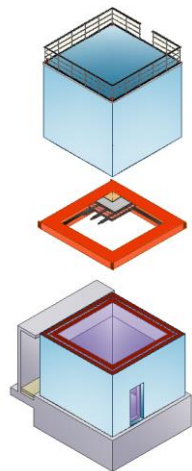
- EN ISO 10140-4:2010 [2], relativa aos requisitos inerentes aos processos de medição.
- EN ISO 10140-2:2010 [3], referente à medição do isolamento sonoro a sons aéreos;
- EN ISO 10140-3:2010 [4], respeitante à medição do isolamento sonoro de pavimentos a sons de percussão;
- Anexo H da norma EN ISO 10140-1:2008 [5], correspondente à medição da redução de transmissão sonora de revestimentos de piso em pavimento normalizado;
- NP EN ISO 354:2007 [6], relativa à determinação dos tempos de reverberação.

No decurso do trabalho conducente a esta dissertação, foi necessário participar nos trabalhos de preparação e avaliação das câmaras acústicas do ITeCons, de forma a verificar todos os requisitos exigidos pelas normas. Apresentam-se somente os procedimentos relacionados com as câmaras acústicas verticais por estas serem essenciais à realização do presente trabalho.

Neste capítulo, serão descritos os trabalhos preparatórios realizados nas câmaras acústicas verticais, bem como os processos de caracterização de forma a torná-las aptas para a realização de ensaios de avaliação do desempenho ao isolamento sonoro. Nas secções seguintes, descrevem-se as instalações de ensaio, os equipamentos usados para a verificação das especificações normativas, os trabalhos preparatórios e apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização das instalações.

4.2 DESCRIÇÃO DAS CÂMARAS ACÚSTICAS VERTICAIS

O sistema concebido para a realização de ensaios de isolamento sonoro a sons aéreos e a sons de percussão é composto por duas câmaras sobrepostas: a câmara inferior é fixa e a superior é móvel, sendo a sua movimentação realizada com o recurso a uma ponte rolante. A câmara superior funciona como emissora e a câmara inferior como receptora. Ambas as câmaras comunicam entre si através de uma abertura de 10 m² onde é colocado o provete de ensaio (Figura 4.1).



a) Esquema geral.



b) Vista exterior das câmaras.

Figura 4.1 – Câmaras acústicas verticais do ITeCons.

A Norma EN ISO 10140-5:2010 [1] determina o cumprimento das seguintes condições:

- O volume e as dimensões das câmaras de ensaio não devem ser iguais, sendo recomendável uma diferença entre os volumes e/ou dimensões de pelo menos 10%;
- O volume mínimo de cada câmara deve ser 50 m³;
- O campo sonoro deve ser difuso no interior das câmaras, pelo que, verificando-se grandes variações dos níveis de pressão, será necessário recorrer à instalação de difusores no seu interior;
- O tempo de reverberação, T_r (s)², nas baixas frequências deve satisfazer as seguintes condições:

$$1.00 \text{ s} \leq T_r \leq 2 \left(\frac{V}{50} \right)^{2/3} \quad (4.1),$$

em que V corresponde ao volume da câmara, em m³;

- O ruído de fundo na câmara receptora deve ser suficientemente baixo para que os resultados do ensaio de isolamento sonoro não sejam afectados;
- As transmissões indirectas não podem influenciar os resultados dos ensaios.

² O tempo de reverberação foi quantificado de acordo com os requisitos definidos pelas normas ISO 10140-5:2010 [1] e NP EN ISO 354:2007 [6].

4.2.1 Câmara Vertical Fixa

A câmara fixa tem um volume de 75.27 m^3 e é constituída por duas estruturas independentes, formando duas caixas que se baseiam no conceito de *box-in-a-box* com a face superior aberta, onde é colocado o pavimento a ensaiar.

A estrutura da caixa interior é integralmente executada em betão armado, com todas as suas superfícies em elementos planos com 0.200 m de espessura. A parede exterior, em alvenaria de tijolo apresenta uma espessura de 0.220 m, é rebocada pelo exterior e está confinada numa estrutura reticulada de betão armado. A laje de pavimento da caixa exterior, em betão armado, apresenta 0.200 m de espessura e assenta na laje do piso térreo do próprio edifício (Figura 4.2), enquanto a laje de pavimento interior se apoia num sistema de isolamento de cofragem perdida de 0.018 m sobre apoios antivibráticos de mola. A separação física entre a câmara e a laje do piso térreo do edifício foi concretizada através da aplicação de uma manta resiliente de granulado de borracha.

As estruturas das caixas interior e exterior são independentes uma da outra, com um espaço entre si de 0.070 m de espessura que se encontra preenchido com lã de rocha de massa volúmica 70 kg/m^3 . Ambas as estruturas contactam entre si na zona de apoio da laje de pavimento interior, *i.e.*, entre a face superior da laje exterior e a face inferior da laje interior, conforme se pode verificar na representação esquemática da Figura 4.2.

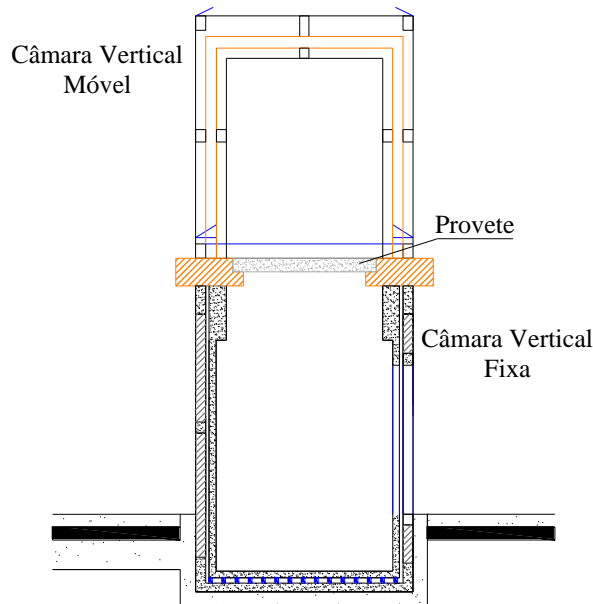


Figura 4.2 - Corte esquemático do sistema de câmaras verticais.

A frequência natural do sistema definido pela malha principal de apoios de mola, com aproximadamente 3 unidades/m², é igual a 4 Hz. Adicionalmente, existem apoios no perímetro do pavimento da câmara, dado ser a zona que recebe a carga proveniente das paredes.

As caixas interior e exterior são rematadas por tiras resilientes de borracha que determinam uma frequência de ressonância de 11 Hz.

O acesso ao interior das câmaras é feito através de um sistema de duas portas, cada uma instalada em sua caixa e cuja exigência individual mínima de isolamento é de 54 dB. As portas estão instaladas em cada uma das caixas e o espaço ao longo do contorno entre as duas portas encontra-se revestido com tela, evitando, desta forma, a dispersão das fibras de lã de rocha que preenche a caixa-de-ar (Figura 4.3).



Figura 4.3 - Pormenor das portas de acesso ao interior da câmara fixa.

4.2.2 Câmara Vertical Móvel

A câmara móvel tem 52.87 m³ de volume e, como se referiu anteriormente, funciona como câmara emissora, sendo movimentada através do auxílio de equipamento de elevação, *i.e.* uma ponte rolante (Figura 4.4). A câmara móvel é constituída por duas estruturas metálicas, uma interior e outra exterior, fisicamente desligadas entre si. As estruturas metálicas são constituídas por perfis rectangulares ocos de forma a aligeirar o seu peso próprio, dado tratar-se de um sistema móvel. As estruturas que constituem a câmara móvel são accionadas por um mecanismo elevatório que garante a sua movimentação como um conjunto, através de um sistema de guiamento e centragem acoplado entre as estruturas.

A estrutura metálica exterior comporta um sistema em sanduíche formado por duas placas de aparas de madeira aglomeradas com cimento, da marca comercial *Viroc*, de 0.016+0.016 m, uma membrana acústica da marca comercial *Danosa*, de 0.004 m de espessura, e uma placa

Viroc de 0.022 m. A estrutura interior é preenchida por um sistema em sanduíche constituído por duas placas *Viroc*, com espessuras de 0.012 m, intercaladas com uma membrana acústica *Danosa*. As juntas das placas *Viroc* estão seladas com betume e desencontradas entre si, nas camadas múltiplas do sistema. A caixa-de-ar entre as duas estruturas encontra-se preenchida com lã de rocha de espessura 0.070 m e massa volúmica 70 kg/m^3 . Cada estrutura é colmatada na base e ao longo do seu perímetro, *i.e.* na zona de contacto com o aro metálico onde se insere o provete a ensaiar, com uma tira de material resiliente.

O acesso ao interior da câmara é feito através de duas portas cujos requisitos acústicos, instalação e cuidados de manutenção são idênticos aos referidos para a câmara fixa.



a) Movimentação da câmara vertical



b) Movimentação de um provete.

Figura 4.4 - Sistema de movimentação da câmara vertical móvel.

4.2.3 Equipamentos de Ensaio

O equipamento de aquisição de sinal é baseado num sistema multianalisador Pulse, modelo 3560-C-T46, da marca comercial *Bruel & Kjaer*, com cinco canais (Figura 4.5 a)). A este sistema conectam-se os microfones instalados no interior das câmaras acústicas (Figura 4.6), os acelerómetros utilizados para registo das vibrações nos provetes de ensaio (Figura 4.7) e as fontes sonoras de ruídos aéreos e de ruídos de percussão (Figura 4.8).

As câmaras acústicas do ITeCons foram projectadas de modo a poderem ser monitorizadas a partir de uma sala de controlo (Figura 4.5 c)) localizada junto às instalações de ensaio, podendo, desta forma, os ensaios decorrer sem influência de factores humanos. A partir da referida sala de controlo também é possível visualizar o curso dos ensaios sem necessidade de ali aceder, já que existem câmaras de vídeo instaladas no interior das câmaras verticais. As câmaras de vídeo estão acessíveis a partir da rede informática estruturada no edifício (Figura 4.5 d)). Na fase de projecto foi prevista a instalação das cablagens necessárias ao controlo da operação dos equipamentos de ensaio e de aquisição de dados, nomeadamente das fontes sonoras (omnidireccional de ruídos aéreos e normalizada de percussão) e dos microfones

estáticos e rotativos montados em dispositivos giratórios. Os equipamentos usados nos trabalhos preparatórios das câmaras verticais foram os seguintes:

- Multianalisador *Brüel & Kjær*, modelo 3560-C-T46, que permite gerar sinais e realizar, em simultâneo, medições em vários canais com várias fontes (Figura 4.5 a));
- Amplificador *Brüel & Kjær*, referência 2716 (Figura 4.5 b));
- Calibrador acústico tipo 1, conforme definido na norma IEC 942;
- Microfone *Brüel & Kjær*, referência 4190 (Figura 4.6 a)) e dispositivo rotativo *Brüel & Kjær*, referência 3923 (Figura 4.6 b));
- Acelerómetros *Brüel & Kjær*, referência 752A12 e 752A13 (Figura 4.7);
- Fonte sonora omnidireccional, *Brüel & Kjær*, referência 4292 (Figura 4.8 a)) e máquina de percussão, *Brüel & Kjær*, referência 3207 (Figura 4.8 b)).



a) Multianalisador *input/output* *Brüel & Kjær*, modelo 3560-C-T46.



b) Amplificador, *Brüel & Kjær*, referência 2716.



c) Equipamento de ensaio na sala de controlo.



d) Monitorização dos ensaios através de câmaras de vídeo instaladas no interior das câmaras de ensaio.

Figura 4.5 – Equipamentos para emissão de sinais e aquisição de dados.



a) Microfone, *Brüel & Kjær*,
referência 4190



b) Dispositivo rotativo *Brüel & Kjær*,
referência 3923.

Figura 4.6 – Microfone rotativo.



Figura 4.7 - Acelerômetro, *Brüel & Kjær*, referência 752A12 e 752A13.



a) Fonte omnidireccional.



b) Máquina de percussão.

Figura 4.8 – Fontes sonoras.

4.3. PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS CÂMARAS VERTICAIS

A aptidão das câmaras acústicas para a realização de ensaios de isolamento sonoro de elementos de compartimentação horizontais, a sons aéreos e a sons de percussão, depende da limitação dos tempos de reverberação no interior das câmaras acústicas e do factor de perdas³. Para evitar que seja necessário avaliar a contribuição das transmissões marginais sempre que se obtém um bom desempenho acústico, deve determinar-se o índice de redução sonora máximo relativo a uma gama de soluções representativas que, normalmente são ensaiadas em laboratório.

Nas secções seguintes são apresentados os tempos de reverberação determinados antes e depois da correcção e os valores máximos dos índices de redução sonora das câmaras acústicas verticais com um pavimento do tipo A e um pavimento do tipo C.

4.3.1 Tempo de Reverberação, T_r

Os procedimentos adoptados para a medição dos tempos de reverberação estão de acordo com as especificações preconizadas pelas normas ISO 10140-4:2010 [2], ISO 10140-5:2010 [1] e NP EN ISO 354:2007 [6], tendo sido quantificados 6 decaimentos, em cada banda de frequência, para 1 posição de fonte e 3 posições de microfone.

No que se refere às exigências das câmaras horizontais destinadas a ensaios de isolamento sonoro a sons aéreos, a norma EN ISO 10140-5:2010 [1] determina que se estabeleça um campo sonoro difuso e que o tempo de reverberação nas câmaras, nas baixas frequências, se situe no intervalo de valores definido pela expressão (4.1). O tempo de reverberação, para uma determinada banda de frequências, corresponde ao intervalo de tempo necessário para que a energia envolvida na propagação do som num espaço confinado atinja 10^{-6} do seu valor inicial, *i.e.*, decresça 60 dB.

Após a construção das câmaras verticais, procedeu-se à quantificação dos tempos de reverberação no interior das câmaras fixa e móvel vazias, tendo-se constatado que os tempos de reverberação apresentavam valores muito elevados no domínio das baixas frequências, ou seja, os valores, experimentalmente determinados, estavam fora do intervalo definido pelas condições definidas pela expressão (4.1).

Para reduzir os tempos de reverberação foram instaladas, em ambas as câmaras, telas duplas de (100%) linho e de (50%) algodão com (50%) poliéster com dimensões $1.250 \times 1.250 \text{ m}^2$, $1.000 \times 1.000 \text{ m}^2$ e $0.750 \times 0.750 \text{ m}^2$ e caixas de ressonância forradas com telas

³ Os procedimentos adoptados para a determinação do factor de perdas são apresentados na secção 4.4.3.

de linho (100%), de dimensões $0.750 \times 0.750 \times 0.660 \text{ m}^3$ e $0.670 \times 0.515 \times 0.370 \text{ m}^3$. No espaço interior das telas duplas foram incorporados painéis de lã de rocha de 0.030 m e 0.050 m de espessuras. Estas telas foram suspensas nas paredes das duas câmaras, segundo posições e inclinações aleatórias, como se demonstra através das Figuras 4.9 e 4.10. O número de telas e as suas posições foram ajustadas de forma a cumprir os tempos de reverberação requeridos.



Figura 4.9 – Câmara vertical fixa após a correção dos tempos de reverberação.



a) Interior da câmara com máquina normalizada de sons de percussão.



b) Interior da câmara com fonte normalizada de sons aéreos suspensa e microfone móvel.

Figura 4.10 - Câmara vertical móvel após a correção dos tempos de reverberação.

A câmara vertical fixa tem um volume de 75.27 m^3 , pelo que deve apresentar tempos de reverberação compreendidos entre $1.00 \text{ s} \leq T_r \leq 2.63 \text{ s}$, na região das baixas frequências, de acordo com a expressão (4.1). Enquanto, segundo a mesma expressão, os tempos de reverberação na câmara móvel, de volume 52.87 m^3 , devem estar compreendidos entre o domínio definido por $1.00 \text{ s} \leq T_r \leq 2.08 \text{ s}$, na gama das baixas frequências. Na Tabela 4.1 exibem-se os tempos de reverberação medidos no interior das câmaras fixa e móvel, antes e depois da correcção acústica com telas e caixas de ressonância.

Como se pode inferir, através da análise dos resultados apresentados na Tabela 4.1, a correcção acústica das câmaras verticais com telas e caixas de ressonância, permitiu satisfazer as condições definidas pela expressão (4.1). Os tempos de reverberação designados «depois da correcção», na Tabela 4.1, resultaram de um processo iterativo em que se testaram várias telas e caixas de ressonância de diversas dimensões e em posições distintas.

Tabela 4.1 - Tempos de reverberação finais médios nas câmaras receptora e emissora após a colocação das telas e caixas reverberantes, quando o provete é constituído pela laje de betão armado de referência de 0.140 m de espessura (laje do ITeCons).

Tempo de Reverberação (s)				
Frequência (Hz)	Câmara receptora		Câmara emissora	
	<i>Antes da correcção</i>	<i>Depois da correcção</i>	<i>Antes da correcção</i>	<i>Depois da correcção</i>
100	15.15	2.54	4.42	1.61
125	18.31	2.29	4.06	1.88
160	16.59	1.84	3.72	2.02
200	12.71	1.69	4.97	1.91
250	12.47	1.55	3.86	1.30
315	10.72	1.24	3.90	1.40
400	8.80	1.12	3.03	1.14
500	8.17	0.98	2.40	0.94
630	6.49	1.01	2.56	0.94
800	5.76	1.03	2.93	0.93
1000	5.19	1.08	3.13	1.04
1250	4.70	1.18	3.00	0.98
1600	4.24	1.14	2.49	0.91
2000	3.69	1.10	2.26	0.82
2500	3.26	1.08	2.05	0.78
3150	2.70	1.07	2.05	0.78
4000	2.25	1.00	1.93	0.80
5000	1.94	0.92	1.80	0.77

4.3.2 Valor Máximo do Índice de Redução Sonora das Câmaras, $R'_{\text{máx}}$

Em ambiente laboratorial, as medições acústicas são realizadas partindo do pressuposto que toda a energia sonora que se propaga do local de emissão para o local de recepção se transmite através do elemento de separação colocado entre os locais de emissão e de recepção. No entanto, e apesar dos elementos envolventes ao provete a ensaiar apresentarem elevada massa, limitando significativamente os percursos marginais do campo sonoro, é necessário determinar o valor máximo de redução sonora das instalações de ensaio, $R'_{\text{máx}}$.

O factor de transmissão sonora, τ , de um determinado elemento traduz a relação entre a potência sonora transmitida, W_t , através desse elemento e a potência sonora incidente, W_i , na sua superfície, *i.e.* $\tau = \frac{W_t}{W_i}$. Da transposição desta relação, em escala decimal, para uma escala logarítmica resulta o índice de redução sonora $R=10\log\left(\frac{1}{\tau}\right)=10\log\left(\frac{W_i}{W_t}\right)$.

Assumindo que o campo sonoro que se estabelece no local de emissão e no local de recepção, *i.e.* na câmara emissora e na câmara receptora, é difuso e que a intensidade do campo sonoro incidente, I_i , e a potência sonora transmitida, W_t através de uma superfície, S , são expressas por $I_i = \frac{p_s^2}{4\rho_0 c_0}$ e $W_t = I_t S = \frac{p_r^2}{4\rho_0 c_0} A_r$, respectivamente (nestas expressões, p_s corresponde à pressão sonora no local de emissão; ρ_0 à massa volúmica do ar; c_0 à velocidade do ar; $I_t = \frac{p_r^2}{4\rho_0 c_0}$ à intensidade sonora transmitida para o local receptor onde a pressão sonora é p_r e a área de absorção total é A_r), o factor de transmissão sonora, τ , pode ser expresso da seguinte forma:

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} = \frac{I_t \cdot S}{I_i \cdot S} = \frac{p_r^2 \cdot A_r}{p_s^2 \cdot S} \quad (4.2),$$

tendo em conta esta expressão, o índice de redução sonora, R , será

$$R = 20\log\left(\frac{p_s}{p_r}\right) + 10\log\frac{S}{A_r} \quad (4.3),$$

ou, de forma equivalente,

$$R = L_s - L_r + 10\log\frac{S}{A_r} \quad (4.4),$$

em que $(L_s - L_r) = D$ corresponde à diferença entre os níveis de pressão sonora medidos entre as câmaras emissora e receptora, com o provete a testar.

O índice de redução sonora máximo, $R'_{\text{máx}}$, de elementos horizontais que podem ser testados em laboratório, sem serem afectados de forma significativa por

transmissões marginais, depende do tipo de elemento a ser ensaiado. De acordo com a norma EN ISO 10140-5:2010 [1], será necessário investigar as transmissões marginais apenas no caso em que o valor obtido no ensaio de isolamento sonoro a sons aéreos em cada banda de frequência, R' , do provete testado seja superior a $(R'_{\text{máx}}-15)$ dB. O anexo A da norma EN ISO 10140-5:2010 [1] indica algumas construções representativas a serem ensaiadas em câmaras verticais, designadamente o pavimento do tipo A (pavimento leve), o pavimento do tipo B (pavimento leve em alvenaria) e o pavimento do tipo C (pavimento pesado em betão). No laboratório do ITeCons, foram construídos e ensaiados os pavimentos dos tipos A e C.

4.3.2.1 Pavimento do Tipo A

De acordo com a norma EN ISO 10140-1:2010 [5], o pavimento do tipo A é constituído por uma estrutura de madeira revestida superiormente por painéis de madeira com 0.020 m de espessura (Figura 4.16 a)) e inferiormente por 2 estratos constituídos por placas de gesso cartonado de 0.0125 m de espessura, com juntas desencontradas, barradas e calafetadas. Os revestimentos estão separados entre si por uma caixa-de-ar parcialmente preenchida por uma camada de lã de rocha com 0.100 m de espessura e com massa volúmica 70 kg/m³ (Figura 4.16).



a) Vista inferior do provete sem o revestimento.



b) Provete instalado sobre a câmara fixa.

Figura 4.11 - Pavimento do tipo A.

Os resultados do ensaio normalizado de isolamento sonoro a sons aéreos, em bandas de terço de oitava, realizado no pavimento do tipo A são apresentados na Tabela 4.2. O índice de isolamento sonoro, R_w , é igual a 49 dB.

Tabela 4.2 - Isolamento sonoro a sons aéreos normalizado com o pavimento do tipo A.

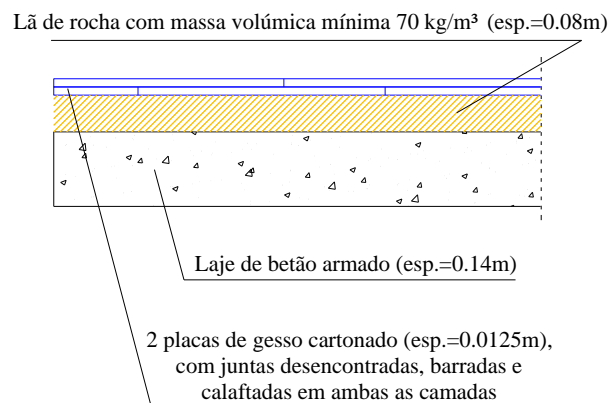
Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	
R (dB)	38.0	32.8	34.4	39.9	39.0	40.6	40.7	42.8	48.1	
										R _w (dB) 49.0
Frequência (Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
R (dB)	49.9	51.6	54.9	58.0	60.1	59.4	60.1	64.5	65.9	

4.3.2.2 Pavimento do Tipo C

A solução do tipo C é constituída por uma laje de 0.140 m de espessura sobre a qual se colocou um revestimento executado por duas placas de gesso cartonado de 0.0125 m de espessura, com juntas desencontradas e convenientemente barradas, com bandas de papel e massa de acabamento e calafetadas, com bandas acústicas no perímetro da câmara em ambas as camadas. Por sua vez, estas foram assentes sobre uma camada de lã de rocha com 0.080 m de espessura (Figura 4.12).



a) Provete instalado nas câmaras verticais.



b) Representação esquemática da constituição do pavimento do tipo C.

Figura 4.12 - Pavimento do tipo C.

Os resultados do ensaio normalizado de isolamento sonoro a sons aéreos, em bandas de terço de oitava, realizado no pavimento do tipo C são apresentados na Tabela 4.3. O índice de isolamento sonoro, R_w, é igual a 72 dB.

Tabela 4.3 - Isolamento sonoro a sons aéreos normalizado com o pavimento do tipo C.

Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	
R (dB)	55.7	52.8	56.8	64.5	68.9	69.1	74.1	74.9	73.3	
										R_w (dB) 72.0
Frequência (Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
R (dB)	71.7	71.2	72.0	72.3	72.7	72.3	73.7	73.6	66.7	

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA LAJE DE REFERÊNCIA DE BETÃO ARMADO (LAJE DO ITECONS)

No laboratório do ITeCons construiu-se uma laje maciça de betão armado de 0.140 m de espessura que servirá de pavimento de suporte aos revestimentos a ensaiar. Esta laje é designada por laje de referência do ITeCons e foi usada para caracterizar o isolamento sonoro a sons aéreos de um pavimento pesado (pavimento do tipo C).

A laje de betão armado com 0.140 m de espessura (Figuras 4.13 e 4.14 a)), construída no ITeCons para servir de pavimento de referência, tem a particularidade de apresentar as faces aparentes perfeitamente niveladas. Esta laje, a que se designou laje de referência do ITeCons, fica apoiada no bordo interior de um aro metálico pré-fabricado com 0.180 m de largura cuja estrutura é constituída por chapa de aço com 0.005 m de espessura, preenchida com betão (Figura 4.13). Este aro foi concebido com um rebaixo que permite o apoio de 0.200 m das lajes a ensaiar, ficando estas separadas da moldura metálica através de uma borracha com 0.020 m de espessura. O aro metálico delimita uma área aberta quadrada de 10 m², onde é apoiado o provete com 12.69 m². O aperto entre câmaras é garantido pelo peso da câmara vertical móvel, com cerca de 25 toneladas. Nas câmaras, a zona de contacto com o aro metálico é revestida com materiais elásticos de forma a evitar ligações rígidas.

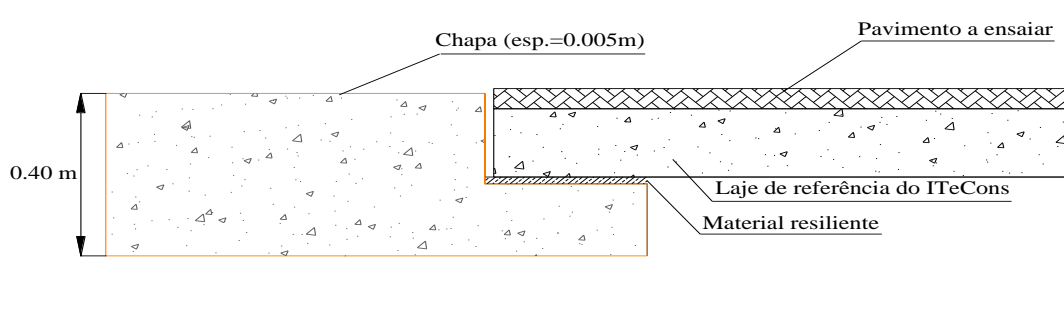


Figura 4.13 - Pormenorização do apoio da laje de referência do ITeCons.

Para a medição da redução da transmissão sonora de revestimentos dos pavimentos flutuantes com aplicação de uma lajeta de betão, foram ainda fabricadas duas lajetas (Figura 4.14 b)) com 0.050 m e 0.070 m de espessura, ambas amovíveis através de uma ponte rolante e nas quais se procurou igualmente garantir um perfeito desempenho das faces.



a) Laje de referência do ITeCons.



b) Lajetas de betão armado, para o ensaio de revestimentos de piso.

Figura 4.14 – Laje e lajetas de referência, em betão armado

4.4.1 Isolamento Sonoro a Sons Aéreos

O ensaio de isolamento sonoro a sons aéreos foi efectuado de acordo com a norma NP EN 20140-2:2010 [3]. Neste ensaio, utilizou-se um microfone móvel com 1.000 m de raio de varrimento, que se movimenta num plano com cerca de 10° de inclinação e com período de rotação igual a 32 s. Consideraram-se 2 posições de fonte e uma posição de microfone móvel, respeitando os afastamentos aos difusores, às paredes das câmaras e entre si, indicados na referida norma.

A medição dos tempos de reverberação seguiu os procedimentos da norma NP EN ISO 354:2007 [6], descrita em 4.3.1. Na Tabela 4.4, apresentam-se os resultados obtidos, em bandas de terço de oitava, do isolamento sonoro a sons aéreos que determinam para o índice de isolamento sonoro, R_w , o valor de 49 dB.

Tabela 4.4 - Isolamento sonoro a sons aéreos da laje de referência do ITeCons.

Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	
R (dB)	40.7	34.5	32.6	36.5	38.4	40.1	43.2	42.6	47.6	
										Rw (dB) 49.0
Frequência (Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
R (dB)	48.5	50.8	55.4	57.0	59.4	61.2	63.5	65.7	66.0	

4.4.2 Isolamento Sonoro a Sons de Percussão

O ensaio de isolamento sonoro a sons de percussão foi realizado de acordo com os procedimentos descritos na norma EN ISO 10140-3:2010 [4].

Neste ensaio, usou-se igualmente um microfone móvel nas condições acima descritas. Foram realizadas medições para 4 posições de fonte. No posicionamento do microfone e da fonte, foram garantidas as seguintes distâncias mínimas indicadas na norma: 0.700 m entre qualquer posição de microfone e as paredes da câmara e os difusores e 1.000 m entre posição do microfone e a fonte.

O tempo de reverberação foi medido de acordo com os procedimentos indicados na norma NP EN ISO 354:2007 [6]. Foram medidos 6 decaimentos, em cada banda de frequência de terço de oitava, para uma posição de fonte e 3 posições de microfone.

Na Tabela 4.5, apresenta-se o nível sonoro de percussão normalizado em bandas de terços de oitava, cujo valor do índice de redução sonora, $L_{n,w}$, é 83 dB.

Tabela 4.5 - Isolamento sonoro a sons de percussão da laje de referência do ITeCons.

Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	
L_n (dB)	52.5	62.7	72.3	68.1	73.0	76.2	74.7	74.7	75.5	
										$L_{n,w}$ 83.0
Frequência (Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
L_n (dB)	77.5	76.8	76.2	76.7	77.2	76.8	76.3	74.9	71.7	

4.4.3 Factor de Perdas Total, η_{total}

O factor de perdas total, η_{total} , foi determinado de acordo com a metodologia prevista na norma EN ISO 10140-5:2010 [1]. O factor de perdas total inclui as fracções de energia dissipada, devidas a perdas internas, perdas nas fronteiras e perdas por radiação.

A norma EN ISO 10140-4:2010 recomenda que o factor de perdas seja avaliado, indicando, para o efeito, o procedimento descrito na norma EN ISO 10848-1:2006 [7], para o cálculo do tempo de reverberação estrutural, T_s . De acordo a referida norma, o factor de perdas total, η_{total} , deve ser determinado através da seguinte expressão:

$$\eta_{\text{total}} = \frac{2.2}{f_0 \cdot T_s} \quad (4.5),$$

nesta equação, T_s (s) corresponde ao tempo de reverberação estrutural e f_0 (Hz) à frequência natural de oscilação de um sistema não amortecido (*eigenfrequency*), em bandas de um terço de oitava, admitindo-se a modelação do sistema através de um conjunto constituído por uma massa, m , uma mola de rigidez k e um amortecedor cujo coeficiente de amortecimento é c , em oscilação livre. Nestas condições, *i.e.*, quando o coeficiente de amortecimento é nulo, a frequência natural de oscilação ou frequência fundamental pode ser determinada em função da rigidez da mola, k , e da massa do corpo, m , através da expressão $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$. Quando as perdas de energia de um determinado material não são significativamente grandes, o factor de perdas total, η_{total} , pode ser determinado através da expressão (4.5). No entanto, se o elemento ou sistema em estudo for passível de perder grandes quantidades de energia, os tempos de reverberação associados serão demasiado curtos para garantir resultados precisos ao factor de perdas, η_{total} [8].

A avaliação do factor de perdas foi realizada na laje de referência do ITeCons (Figura 4.15), seguindo os procedimentos indicados na norma EN ISO 10140-4:2010 [2].



Figura 4.15– Laje de referência do ITeCons.

De acordo com a norma EN ISO 10140-5:2010 [1] em estruturas pesadas, nomeadamente paredes de massa $m \geq 150 \text{ kg/m}^2$, é necessário garantir que o factor de perdas seja superior ao valor determinado através da expressão:

$$\eta_{\min} = 0.01 + \frac{0.03}{\sqrt{f}} \quad (4.6),$$

em que f (Hz) corresponde ao valor da frequência de ensaio.

No que se refere a pavimentos, a mesma norma estabelece que se deve usar um pavimento de betão com massa $300 \pm 30 \text{ kg/m}^3$. A laje de betão armado de referência (de massa volumica 2400 kg/m^3) do ITeCons, com 0.140 m de espessura, verifica este requisito ($2400 \text{ kg/m}^3 \times 0.14 \text{ m} \approx 300 \text{ kg/m}^2$). Interessa salientar que, apesar de na ocasião em que foram realizados os trabalhos de verificação dos requisitos normativos, a norma então em vigor não exigir a verificação do valor mínimo do factor de perdas, traduzido pela expressão (4.6), essa verificação foi realizada, de acordo com a verificação efectuada para paredes (exigida pela correspondente norma em vigor).

Seguidamente, descreve-se o procedimento adoptado para a referida verificação. Para o cálculo de η_{total} , o tempo de reverberação é determinado, medindo o decaimento da vibração do pavimento sujeito a uma excitação de impacto. A norma aconselha que sejam efectuadas medições com três pontos de excitação e dois pontos de medição, considerando dois decaimentos por ponto (num total de 12 decaimentos). A mesma norma indica que a massa do martelo de excitação deve ser equivalente a cerca de 0.010 m^2 do elemento a excitar. Para o pavimento em análise, a massa do martelo deveria ser cerca de 3.40 kg . Relativamente às características dos acelerómetros, à intensidade da força de impacto, às posições de impacto ou às distâncias entre pontos de medição, nada é especificado pela referida norma. Sabe-se, no entanto, que estes aspectos têm influência nos resultados obtidos, como já foi constatado por outros autores [9], [10]. Desta forma, adoptaram-se as condições impostas no método da norma NT ACOU 090:1994 [11], para medições *in situ* da transmissão de vibrações em edifícios, relativamente à posição dos pontos de medição e dos pontos de impacto. Apesar da norma em referência indicar a massa aproximada do martelo de impacto, optou-se por verificar, se utilizando martelos com diferentes massas, os resultados seriam diferentes. Os ensaios foram realizados com o recurso a três martelos de massas distintas: o martelo A com massa de 0.48 kg , o martelo B com massa de 0.61 kg e o martelo C com massa de 3.90 kg (Figura 4.14).

Na Figura 4.17 a) esquematizam-se as posições de medição, Ac.(1) e Ac.(2), bem como a localização dos pontos de impacto – Ponto 1, Ponto 2 e Ponto 3.

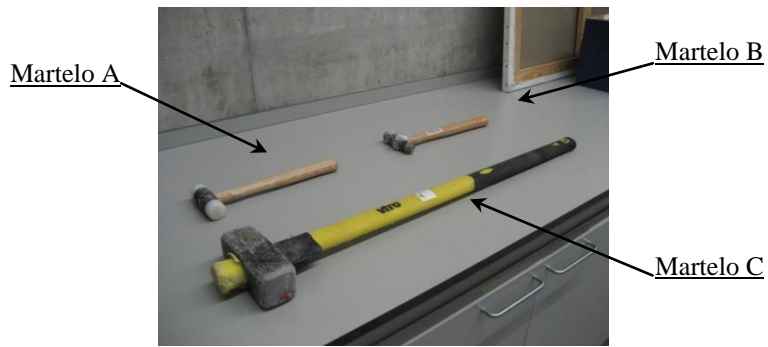
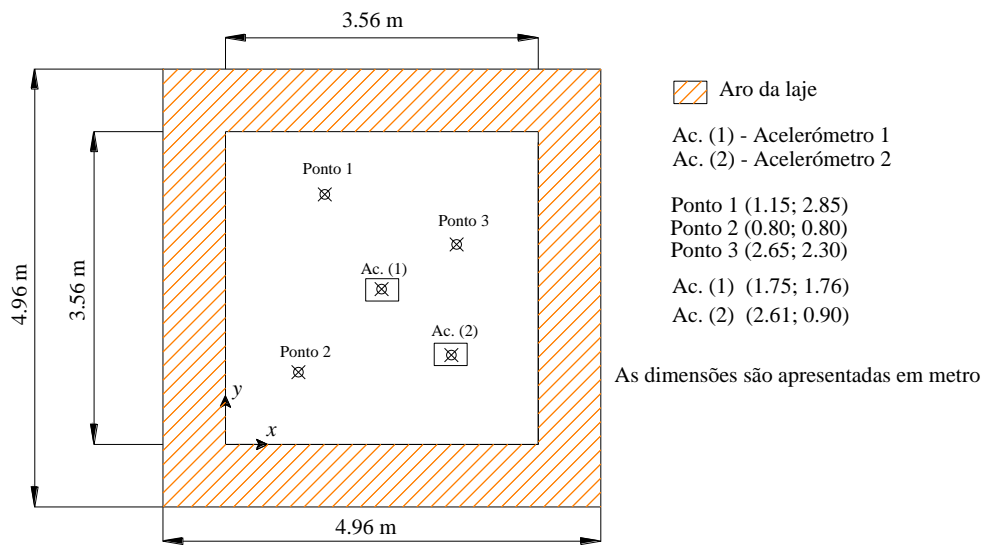


Figura 4.16 - Martelos de impacto usados para determinar o factor de perdas.



a) Esquema representativo da localização dos pontos de medição e da posição dos acelerómetros.



b) Posição dos acelerómetros na laje de referência.

Figura 4.17 - Determinação do factor de perdas da laje de referência.

Na Tabela 4.6, apresentam-se os valores do factor de perda total, η_{total} , determinados através da expressão (4.5), para cada martelo.

Tabela 4.6 – Factor de perdas total correspondente à laje de referência do ITeCons, obtido com os martelos A, B e C.

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
η_{\min}	0.010	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.011	0.011
Martelo A	0.052	0.023	0.022	0.014	0.014	0.014	0.013	0.013	0.012
Martelo B	0.049	0.024	0.023	0.015	0.014	0.014	0.013	0.013	0.012
Martelo C	0.051	0.023	0.023	0.015	0.014	0.014	0.013	0.013	0.012

Freq. (Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
η_{\min}	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.010	0.10
Martelo A	0.012	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012	0.011	0.012
Martelo B	0.012	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.011	0.011
Martelo C	0.012	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012	0.011	0.011

Os resultados obtidos experimentalmente comprovam que, para as diferentes massas dos martelos, o valor do factor de perdas total não se altera significativamente, *i.e.* os resultados são praticamente coincidentes para a maioria das bandas de frequência de um terço de oitava, verificando-se, apenas, alguma dispersão de resultados nas baixas frequências. No entanto, todos os valores determinados são superiores ao factor de perdas mínimo (determinado através da expressão (4.6)).

4.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

No presente capítulo, descreveram-se as câmaras acústicas verticais do ITeCons, os equipamentos usados para a verificação dos requisitos normativos, os trabalhos preparatórios realizados e os resultados dos ensaios de caracterização das instalações laboratoriais.

A descrição das câmaras verticais superior e inferior foi realizada, na secção 4.2, considerando a sua constituição material, as dimensões e respectivo modo de funcionamento. Os equipamentos de ensaio incluem um sistema de aquisição de sinal, microfones instalados no interior das câmaras, acelerómetros e fontes sonoras normalizadas de ruídos aéreos e de percussão. A estes equipamentos juntam-se câmaras de vídeo que permitem, a partir de uma sala de controlo localizada no exterior das câmaras, monitorizar o progresso dos ensaios.

Na secção 4.3, procedeu-se à descrição dos trabalhos de preparação e caracterização das câmaras verticais. Determinaram-se os tempos de reverberação, antes e depois das correcções, tendo-se verificado que, após as correcções, os tempos de reverberação estão de acordo com os requisitos impostos pelas correspondentes normas em vigor. De forma a evitar a necessidade de avaliar a contribuição das transmissões marginais quando se testa um determinado tipo de pavimento, deve-se, ainda, determinar o índice de redução sonora máximo para a gama de

soluções representativas dos pavimentos ensaiados, o que foi realizado para soluções de pavimento leve (ou do tipo A) e pesado em betão (ou do tipo C).

A caracterização da laje de referência de betão armado (laje do ITeCons) foi descrita, na secção 4.4. Esta laje serve de suporte aos revestimentos de piso que se pretendem ensaiar, tendo, assim, sido caracterizada relativamente ao isolamento a sons aéreos e a sons de percussão. Determinou-se, ainda, o factor de perdas total para cada terço de oitava cujos valores se verificou serem superiores aos do factor de perdas mínimo.

De acordo com as verificações realizadas, as câmaras acústicas verticais correspondem às exigências normativas em vigor.

4.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Norma, EN ISO 10140-5:2010. *Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements*. Part 5: Requirements for test facilities and equipment. ISO.
- [2] Norma, EN ISO 10140-4:2010. *Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements*. Part 4: Measurement procedures and requirements. ISO.
- [3] Norma, EN ISO 10140-2:2010. *Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements*. Part 2: Measurement of airborne sound insulation. ISO.
- [4] Norma, EN ISO 10140-3:2010. *Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements*. Part 3: Measurement of impact sound insulation. ISO.
- [5] Norma, EN ISO 10140-1:2010. *Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements*. Part 1: Application rules for specific products. ISO.
- [6] Norma, NP EN ISO 354. *Medição da absorção sonora em câmara reverberante*. IPQ, 2007.
- [7] Norma, EN ISO 10848-1:2006. *Acoustics - Laboratory measurement of the flanking transmission of airborne and impact sound between adjoining rooms*. Part 1: Frame document. ISO.
- [8] Vigran, Tor Erik. 2008. *Building acoustics*. Taylor & Francis.
- [9] Paixão, Dinara Xavier. 2002. *Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria utilizando análise estatística de energia*, SEA. Tese apresentada ao Programa de pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil Universidade de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil.
- [10] Paixão, D. X. e Gerges, S. N. Y. 2004. Perda de transmissão sonora em paredes de alvenaria de tijolo maciço. *Ambiente Construído*. Vols. 4, nº2, pp. 95-110.

- [11] Norma, NT ACOU 090. 1994. *Building structures, junctions: Transmission of vibrations - field measurements*. Nordtest.
- [12] Beranek, L., Vér, I. L. 1992. *Noise and vibration control engineering - Principles and applications*. John Wiley & Sons, Inc.
- [13] Beranek, L. 1960. *Noise reduction*. ed. Leo Beranek. McGraw-Hill Book Company.
- [14] Blauert, J., Xiang, N. 2008. *Acoustics for engineers*. Try Lectures Springer.
- [15] Cremer, L., Heckl, M., Ugar, E. E. 1988. *Structure-borne sound - structural vibrations and sound radiation at audio frequencies*. 2nd edition. Springer-Verlag.
- [16] Delanoy, J., Recuero M. 2007. Loss factor measurements on plasterboard. *19th International Congress on Acoustics Madrid*, 2-7 September. Spain.
- [17] Harris, C. M. 1994. *Noise control in buildings: A guide for architects and engineers*. New York. McGraw-Hill.
- [18] Hongisto, V. 2001. A case study of flanking transmission through double structures. *Applied Acoustics*. Vol. 62, pp. 589-599.
- [19] Johansson, Carin. 1995. Low-frequency impact sound insulation of a light weight wooden joist floor. *Applied Acoustics*. Vol. 44, pp. 133-147.
- [20] Josse, R. 1977. *Notions d'Acoustique - A l'usage des architectes ingénieurs urbanistes*. 3^{ème} édition. Editions Eyroles.
- [21] Meier, A., Schmitz, A. 1999. Application of total loss factor measurements for the determination of sound insulation. *Building Acoustics*. Vol. 6 (No. 2), pp. 71-84.
- [22] Patrício, Jorge. 2007. *Acústica nos Edifícios*. Verlag Dashofer.
- [23] Rasmussen, Birgit and Rindel, Jens Holger. 2010. Sound insulation between dwellings - descriptors applied in building regulations in Europe. *Applied Acoustics*. Vol. 71, pp. 171-180.
- [24] Rasmussen, Birgit. 2010. Sound insulation between dwellings - Requirements in building regulations in Europe. *Applied Acoustics*. Vol. 71, pp. 373-385.
- [25] Schoenwald, S., *et al.* 2010. Approaches for estimating flanking transmission for heavy impact sources. *Internoise 2010*, 13-16 June. Lisbon, Portugal.
- [26] Shi, Wanqing, Johansson, Carin and Sundback, Ulrik. 1997. An investigation of the characteristics of impact sound sources for impact sound insulation measurement. *Applied Acoustics*. Vol. 51 (No.1), pp. 85-108.
- [27] Tasken, E., *et al.* 2010. Approach to predict the normalized impact sound pressure level of resilient supported stairs by means of EN12354. *Internoise 2010*, 13-16 June. Lisbon, Portugal.
- [28] Zeitler, B., Nightingale, T., King F. 2008. Methods to control low frequency impact noise in wood-frame construction, *Acoustics 2008*. Paris, France, pp. 5591-5596.

- [29] Norma, NP EN ISO 717-2:2009 (Ed. 1). *Acústica. Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção*. Parte 2: Isolamento sonoro a sons de percussão. IPQ.
- [30] Norma, EN ISO 10140-1:2010/A1:2012. *Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements*. Part 1: Application rules for specific products - Amendment 1: Guidelines for the determination of the sound reduction index of joints filled with fillers and/or seals. CEN-ISO.
- [31] Norma, NP EN ISO 3382-2:2011. *Acústica. Medição de parâmetros de acústica de salas*. Parte 2: Tempo de reverberação em salas correntes. IPQ.
- [32] Norma, NP EN ISO 3382-2:2011/Errata: 2012. *Acústica. Medição de parâmetros de acústica de salas*. Parte 2: Tempo de reverberação em salas correntes. IPQ.
- [33] Norma, EN ISO 3382-2:2008 (Ed.1). *Acoustics. Measurement of room acoustic parameters*. Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. CEN-ISO.
- [34] Norma, NP EN ISO/IEC 17025:2005. *Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração*. IPQ.

Capítulo 5

Comportamento Acústico de Soluções
Construtivas de Pavimentos Integrando as
Betonihas Seleccionadas

ÍNDICE

- 5.1. Introdução
- 5.2 Avaliações Experimentais
 - 5.2.1 Determinação Experimental da Redução da Transmissão de Sons de Percussão, ΔL_w
 - 5.2.1.1 Procedimentos Experimentais
 - 5.2.1.2 Preparação de Provetes e Equipamentos de Ensaio
 - 5.2.1.3 Apresentação e Análise de Resultados
 - 5.2.2 Determinação Experimental da Rigidez Dinâmica Aparente, s'_t
 - 5.2.2.1 Preparação de Provetes e Descrição dos Procedimentos de Ensaio
 - 5.2.2.2 Apresentação e Análise de Resultados
 - 5.2.3 Discussão dos Resultados Experimentais
- 5.3 Modelo Analítico
 - 5.3.1 Formulação do Problema
 - 5.3.2 Resultados Analíticos
- 5.4 Síntese do Capítulo
- 5.5 Anexo
- 5.6 Referências Bibliográficas

5.1. INTRODUÇÃO

As sociedades actuais são cada vez mais exigentes no que se refere aos níveis de conforto acústico das suas habitações. Paradoxalmente, as mesmas sociedades desenvolvem um número crescente de actividades profissionais ou lúdicas eminentemente ruidosas e, por esse motivo, passíveis de perturbar a integridade física e psíquica de indivíduos que permaneçam nas imediações onde tais actividades decorrem. De acordo com Rasmussen [1], o conforto acústico caracteriza-se pela ausência de qualquer ruído perturbador, pela adequabilidade do nível sonoro de sons de efeito desejável e pela possibilidade de realizar qualquer actividade sem se fazer ouvir, ou incomodar terceiros.

No início do século XX, após a implementação dos primeiros regulamentos contra o risco de incêndio, a atenção focou-se no fraco isolamento sonoro dos edifícios. Nessa época, o ruído em edifícios de habitação, localizados em zonas urbanas, já era considerado uma das principais causas de conflito entre vizinhos e um problema de saúde pública. Nos anos que se seguiram, assistiu-se à implementação gradual dos precursores dos actuais requisitos acústicos em edifícios [1], [2]. Presentemente, nos Estados-membros da União Europeia, os requisitos mínimos de conforto acústico dos edifícios são definidos em regulamentos nacionais e a sua conformidade verificada *in situ*, através de procedimentos estabelecidos em normas internacionais (ISO), europeias (EN) e nacionais. Em Portugal, é o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), através do Decreto-Lei n.º 129/2002, de 11 de Maio com a redacção dada pelo Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho, que impõe e determina a verificação das exigências mínimas de conforto acústico.

Os ruídos produzidos pelo caminhar, queda de objectos ou pelo arrastar de mobiliário, podem ser extremamente incomodativos nos edifícios multi-residenciais de construção corrente, *i.e.*, estruturas de betão armado e paredes de alvenaria de tijolo, pois tanto o fraco amortecimento interno dos materiais, como as ligações entre os elementos promovem a propagação das ondas elásticas. De acordo com Blauert e Xiang [3], o isolamento acústico equivale à circunscrição do campo sonoro, limitando-se, desta forma, a transmissão, total ou parcial, para as suas imediações. O isolamento sonoro baseia-se fundamentalmente num processo de reflexão devido à impedância causada pela existência de descontinuidades em possíveis percursos da transmissão do som.

Uma das formas mais eficientes de assegurar o bom desempenho acústico de um pavimento, no que se refere ao isolamento aos sons de percussão, consiste na utilização de materiais resilientes que accionem o processo de reflexão anteriormente mencionado, reduzindo, dessa forma, a transmissão sonora aos elementos construtivos adjacentes. Os referidos materiais podem ser aplicados no revestimento dos pisos ou interpostos entre as camadas rígidas do

pavimento, no designado sistema de pavimento flutuante. A eficiência do sistema de pavimento flutuante depende das características elásticas do material da camada intermédia e da ausência de ligações rígidas entre a superfície rígida aparente e os elementos estruturais e não estruturais confinantes. Neste caso, a camada resiliente não pode ser demasiado deformável, por motivos de estabilidade do sistema. As características do material resiliente dependem da sua massa volumica, da sua rigidez dinâmica e da sua compressibilidade [4], [5].

As camadas resilientes podem ser constituídas por diversos materiais, como por exemplo, espuma de poliuretano, espuma de polietileno, lã mineral, borracha sintética, cortiça e compósitos de cortiça. No entanto, do processamento de alguns destes materiais, designadamente dos poliméricos, resultam elevados níveis de emissões nocivas para o meio ambiente, contribuindo para o aumento dos gases com efeito de estufa. A utilização de materiais alternativos aos resilientes convencionais tem sido estudada por alguns autores, tanto em camadas de revestimento, como em camadas intermédias do sistema de pavimento. Neithlathet *et al.* [6] demonstraram a eficiência no controlo do ruído de materiais compósitos constituídos por cimento e celulose. Estes autores estudaram a influência do volume e morfologia das fibras de celulose na capacidade de absorção do som e no amortecimento das acções mecânicas do material compósito: à medida que se aumenta a quantidade de celulose, *i.e.* de fibras, no compósito, aumenta o seu amortecimento. Rushforth *et al.* [7] estudaram o desempenho ao isolamento a sons de percussão de materiais destinados a revestimentos de piso, fabricados a partir de resíduos da indústria de tapeçarias. Fernandes *et al.* [8] avaliaram a redução sonora a sons de impacto de um revestimento de piso, constituído pela associação de cortiça e poliuretano. A comparação do desempenho deste material com duas outras soluções comerciais, designadamente MDF¹ e HDF², realizada no referido trabalho, revelou que o compósito de cortiça é mais eficiente nas altas frequências. Olmeda *et al.* [9] avaliaram a redução sonora a sons de impacto de uma betonilha leve de cimento e coque de petróleo (como agregado) e de uma betonilha de cimento e areia. Os resultados revelaram que a adição de coque diminui a resistência mecânica da betonilha. No entanto, aumenta o isolamento sonoro a sons de percussão particularmente nas médias e altas frequências, apesar deste efeito ser menor do que o esperado pelos autores. No que se refere à aplicação de materiais resilientes em sistemas de pavimentos flutuantes, Rodrigues *et al.* [10] estudaram o desempenho ao isolamento a sons de percussão de pavimentos flutuantes com camadas resilientes constituídas por fibra de coco, tendo concluído que a utilização daquele resíduo se traduz na melhoria do isolamento sonoro dos pavimentos estudados. Benkreira *et al.* [11] atestaram a eficácia do isolamento térmico e acústico de materiais compósitos produzidos com resíduos de pneus e de carpetes aglutinados

¹ *Medium Density Fiber.*

² *High Density Fiber.*

com poliuretano. Estes autores verificaram que o desempenho daqueles materiais, quando aplicados nas camadas intermédias dos pavimentos, pode superar o de alguns produtos comerciais. Faustino *et al.* [12] avaliaram o isolamento a sons de percussão de um pavimento reforçado com um painel de fibras de cascas de milho com 0.03 m de espessura. Os resultados deste trabalho evidenciaram-se promissores, comparativamente a outros materiais de isolamento naturais e alternativos. Aos estudos de Rodrigues *et al.* [10], Rushforth *et al.* [7], Benkreira *et al.* [11] e Faustino *et al.* [12] acresce a vantagem de incorporarem materiais provenientes de desperdícios da indústria, cujo processo de revalorização habitual implicaria custos ambientais mais elevados.

A caracterização do isolamento sonoro aos sons de percussão de um elemento construtivo pode ser realizada por diversos métodos e que genericamente se dividem em métodos de previsão, usados em fase de projecto, e métodos de medição que podem ser realizados em laboratório ou *in situ*. As medições realizadas em laboratório têm como principal objectivo a quantificação do isolamento sonoro de um elemento ou solução construtiva, enquanto as medições efectuadas nos edifícios visam a avaliação da conformidade do isolamento sonoro dos elementos construtivos previamente estabelecido em projecto. Desta forma, é possível aferir a eficácia de um pavimento, relativamente ao isolamento aos sons de percussão, através de um ensaio no qual se avalia a quantidade de energia transmitida, para o compartimento contíguo através de um sistema de pavimento, quando este é excitado por uma fonte sonora normalizada de impactos³. Interessa também referir que a eficácia de um elemento construtivo, relativamente ao isolamento aos sons de percussão, depende da propagação directa do campo sonoro através desse elemento e da transmissão pelos elementos de compartimentação adjacentes ao elemento principal. Apesar da transmissão directa ser a componente que mais contribui para a definição do nível sonoro que se estabelece no espaço receptor, não se deve negligenciar a transmissão marginal que pode, em algumas situações, influenciar expressivamente o campo sonoro final [14-17]. Não obstante o anteriormente referido, em medições laboratoriais apenas se avalia a eficácia, do isolamento aos sons de percussão, do elemento ou da solução construtiva em termos da transmissão directa.

Numa abordagem distinta, também é possível estimar a capacidade de atenuar os sons de percussão de pavimentos flutuantes, através da determinação da rigidez dinâmica dos seus materiais resilientes constituintes, já que os materiais com rigidez dinâmica reduzida apresentam bom desempenho ao isolamento aos sons de percussão [4], [5], [18]. As propriedades dinâmicas dos materiais podem ser usadas na previsão do seu comportamento físico [5], [19-23]. Em trabalhos distintos, Stewart e Mackenzie [18], Shiavi *et al.* [4], Neves *et al.* [24] e Kim *et al.* [5]

³Existem diversos métodos de avaliação experimental do isolamento sonoro a sons de percussão. No entanto o mais generalizado é o método ISO CEN já que o seu procedimento está normalizado por *International Organization for Standardization*, ISO, e por *Comité Européen de Normalisation*, CEN [13].

avaliaram a rigidez dinâmica de um significativo número de materiais resilientes usados em pavimentos flutuantes. Stewart e Mackenzie [18] determinaram a rigidez dinâmica de materiais resilientes, através de um método de cálculo alternativo ao convencionalmente utilizado, *i.e.*, através do procedimento preconizado pela norma ISO 9052-1:1989 [25], tendo obtido resultados semelhantes aos determinados por via experimental. Shiavi *et al.* [4] apresentaram um estudo experimental, no qual compararam a redução do nível sonoro a sons de percussão, de pavimentos flutuantes, medido em laboratório com o estimado a partir do conhecimento da rigidez dinâmica da camada resiliente. Neves *et al.* [24] determinaram experimentalmente a rigidez dinâmica de alguns materiais resilientes usados em pavimentos flutuantes e procederam à previsão da atenuação a sons de impacto conferida por esses pavimentos. Kim *et al.* [5] compararam a rigidez dinâmica de diversos materiais resilientes com a redução aos sons de percussão de pavimentos flutuantes, cuja camada elástica é constituída pelos mesmos materiais resilientes. No trabalho mencionado, os autores concluíram que se pode prever, a partir do conhecimento da rigidez dinâmica de uma camada de material resiliente, a rigidez dinâmica de um sistema constituído por várias camadas de material resiliente e que também é possível relacionar a rigidez dinâmica dos materiais resilientes com a redução de sons de impacto dos correspondentes pavimentos flutuantes. Asdrubali *et al.* [26] avaliaram a rigidez dinâmica de betonilhas com a incorporação de resíduos poliméricos, com o objectivo de estimarem o seu desempenho em termos de isolamento sonoro aos sons de percussão, tendo para o efeito também avaliado experimentalmente o índice de redução sonoro aos sons de impacto. No referido estudo, os autores concluíram que não obtiveram resultados concordantes entre a rigidez dinâmica e o índice de redução sonoro aos sons de impacto, devido às reduzidas dimensões dos provetes usados nos ensaios de percussão e à deterioração das amostras pelos impactos da máquina de percussão.

O interesse dos investigadores manifesta-se igualmente ao nível do estudo de métodos de cálculo que permitem modelar os fenómenos físicos que sobrevêm da transmissão de sons de percussão. Neste domínio, é de salientar a importância dos modelos matemáticos os quais, não só, facilitam a compreensão dos problemas, através da sistematização das diversas variáveis envolvidas, como também, numa fase de estudo mais avançada e dependendo do rigor da modelação, possibilitam a previsão dos fenómenos físicos, dispensando-se o recurso a laboriosos e dispendiosos procedimentos experimentais. No domínio do isolamento a sons de percussão, têm sido publicados diversos trabalhos. Stewart e Craik [27] desenvolveram um modelo de previsão da transmissão de ruídos de impacto, através de pavimentos flutuantes sobre uma laje de betão, combinando os resultados obtidos no modelo de onda, formulado por Craik e Wilson [28], com um método de análise estatística de energia (SEA). Por seu turno, Nightgale *et al.* [29] recorreram à simulação do desempenho ao isolamento a sons de percussão em

pavimentos de madeira, através de soluções analíticas que permitem prever os factores que mais influenciam a transmissão marginal na região das baixas frequências. Posteriormente, Zeitler *et al.* [30] efectuaram a verificação experimental dos factores condicionantes identificados, através da simulação desenvolvida por Nightgale *et al.* [29]. Legault e Noureddine [31] desenvolveram um modelo analítico que simula a influência na transmissão sonora das ligações existentes entre os painéis de um elemento de compartimentação duplo. Tadeu *et al.* [32] apresentaram um modelo analítico, baseado em funções de Green, para a previsão do isolamento a sons de percussão de sistemas estratificados. Sousa e Gibbs [33] desenvolveram um modelo analítico para prever a transmissão de ruídos de impacto na região das baixas frequências, em pavimentos flutuantes e em lajes estruturais de betão com enchimentos de betonilhas leves à base de argila expandida.

A precisão de um modelo numérico, relativamente ao fenómeno que se pretende simular, depende não só do rigor da sua formulação, mas também dos dados que nele são introduzidos. No caso específico da simulação da transmissão de sons de percussão através de pavimentos, para além da fidedignidade do modelo numérico, é fundamental conhecer as propriedades dos materiais que fazem parte do elemento construtivo, neste caso, o sistema de pavimento. Assim, numa solução de pavimento flutuante sobre uma laje de betão armado, será indispensável dispor das propriedades de todos os materiais, de modo a que o processo de simulação incorpore o modelo que melhor reproduza o fenómeno de transmissão de ondas através dos vários estratos. As propriedades do betão, por se tratar de um material muito estudado, são sobejamente conhecidas e profusas na bibliografia da especialidade. Já os materiais usados na camada resiliente (*e.g.* feltros, espumas, borrachas ou aglomerados de cortiça), por serem materiais mais recentes e de uso mais restrito, não fruem da mesma divulgação.

No presente capítulo, avalia-se a eficácia do isolamento a sons de percussão de uma série de pavimentos que integram as betonilhas com incorporação de granulados de cortiça expandida (ECG), definidas no Capítulo 2, através da avaliação experimental do índice de redução de transmissão de sons de percussão e da rigidez dinâmica aparente. Esta abordagem experimental é complementada com a validação de um modelo de previsão de isolamento aos sons de percussão, em que se procede à simulação do comportamento dinâmico do sistema de transmissão do som, gerado pela acção de uma força de impacto.

A modelação numérica usada neste trabalho baseia-se na utilização de soluções analíticas desenvolvidas a partir de funções de Green para meios estratificados. Estas soluções analíticas resultam do desenvolvimento das funções de Green para meios infinitos com o recurso à sobreposição do efeito de um conjunto de fontes planas, de acordo com a abordagem bidimensional para a definição do campo de ondas gerado na superfície de um meio sólido, inicialmente proposta por Lamb [34] e posteriormente desenvolvida por Bouchon [35] e Kim e

Papageorgiou [36], para a determinação do campo de ondas tridimensional. Neste domínio de estudo, Tadeu e Kausel [37] derivaram as funções de Green para meios homogêneos e infinitos elásticos e acústicos quando solicitados por fontes lineares harmónicas, segundo a direcção z . Posteriormente, Tadeu e António [38] apresentaram soluções que permitem estudar o campo gerado numa camada elástica que separa um meio acústico, de geometria bidimensional, sujeita ao efeito de cargas tridimensionais. António [39] desenvolveu soluções fundamentais para um meio acústico infinito, com duas camadas sólidas separadas entre si por uma camada fluida e cuja geometria se mantém ao longo de uma direcção. Idêntica metodologia foi usada por Godinho [40] para um sistema constituído por um número elevado de camadas elásticas e acústicas combinadas de forma aleatória. Pereira [41] desenvolveu soluções analíticas e numéricas que permitem estudar a propagação de ondas em sistemas constituídos por camadas acústicas e elásticas com geometria constante ao longo da direcção z e solicitadas por cargas tridimensionais.

Determinaram-se experimentalmente os índices de redução de sons de percussão de dois sistemas de pavimentos: um constituído por uma laje de betão armado com uma camada de enchimento das betonilhas com ECG (M150, M250 e M400); outro constituído por uma laje de betão armado, uma camada intermédia das mesmas betonilhas (M150, M250 e M400) e uma lajeta de betão. As camadas de enchimento e intermédia foram estudadas com as espessuras de 1.5, 3.0 e 4.5 cm. Com o objectivo de compreender a eficácia do isolamento sonoro aos sons de percussão da betonilha com ECG relativamente à cortiça, na forma solta, foi igualmente avaliada experimentalmente uma solução de pavimento flutuante com uma camada intermédia constituída por ECG sem qualquer aglutinante. Na tentativa de relacionar os resultados dos ensaios de percussão dos sistemas de pavimentos, que integram as betonilhas com ECG na sua camada intermédia, com a rigidez dinâmica aparente das betonilhas, avaliou-se, ainda, em laboratório, a rigidez dinâmica aparente das betonilhas com ECG, nas espessuras de 1.5, 3.0 e 4.5 cm. Os ensaios de rigidez dinâmica aparente foram realizados com o recurso a provetes de dimensões reduzidas.

A previsão do isolamento sonoro a sons de percussão dos sistemas de pavimento flutuante que integram as betonilhas com ECG (M150, M250 e M400) foi determinada através do modelo numérico, atrás referido, que simula o comportamento dinâmico do sistema de transmissão do som. Os resultados destas modelações são comparados com os obtidos experimentalmente, de modo a avaliar o modelo numérico perante este tipo de soluções e viabilizar a sua utilização na previsão de resultados para outros sistemas construtivos de pavimentos que não foram testados no âmbito da presente dissertação.

Na secção seguinte, descrevem-se os procedimentos adoptados para a realização dos ensaios de percussão e para a avaliação da rigidez dinâmica aparente das betonilhas com ECG

(M150, M250 e M400). Após a apresentação dos resultados experimentais e da sua comparação entre si, é descrito, na secção 5.3, o modelo analítico usado na previsão do isolamento sonoro a sons de percussão, dos sistemas de pavimento que integram as betonilhas com ECG. Por último, são apresentados os resultados das simulações do isolamento sonoro conferido pelos sistemas de pavimentos que integram as betonilhas com ECG e comparados com os resultados experimentais dos ensaios de percussão.

5.2 AVALIAÇÕES EXPERIMENTAIS

Nesta secção, apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização do índice de redução sonora a sons de percussão, ΔL_w , de dois sistemas de pavimentos: um constituído por uma laje de betão armado de espessura 0.14 m e uma camada de betonilha leve e o outro constituído por uma laje de betão armado de espessura 0.14 m, uma camada de betonilha leve e uma lajeta de betão armado de espessura 0.03 m. As betonilhas aplicadas nos referidos sistemas de pavimento foram M150, M250 e M400, com as espessuras 1.5, 3.0 e 4.5 cm. As composições destas betonilhas foram definidas no Capítulo 2. Testou-se ainda uma solução em que a camada intermédia, do sistema de pavimento, é constituída por granulado solto de cortiça com 50% de ECG 3/5 e 50% de ECG 5/10 (ECG 3/5+5/10). São ainda apresentados os resultados da avaliação experimental de rigidez dinâmica aparente das betonilhas leves (M150, M250 e M400), com as espessuras 1.5, 3.0 e 4.5 cm. Os ensaios foram realizados no Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (ITeCons).

5.2.1 Determinação Experimental da Redução da Transmissão de Sons de Percussão, ΔL_w

5.2.1.1 Procedimentos Experimentais

De acordo com as normas EN ISO 10140-3:2010 [42] e NP EN ISO 717-2:2006 [43], os valores de ΔL_w devem ser reportados a um pavimento de referência para o qual o nível de pressão sonora transmitido é $L_{n,r,0}$ (dB) e o correspondente índice ponderado é $L_{n,r,w,0} = 78$ dB. O pavimento de referência corresponde a um elemento de compartimentação de betão armado, homogéneo com 0.140 m de espessura cujo nível sonoro radiado é igual a 72 dB, a partir da frequência centrada de 1000 Hz [43]. Neste trabalho, designar-se-á à laje de referência laje do ITeCons.

Em medições laboratoriais determinaram-se, para cada banda de frequência em um terço de oitava i , o nível sonoro médio, L_{med_i} (dB), na câmara receptora resultante da solicitação da laje de pavimento pela fonte normalizada de ruídos de percussão:

$$L_{med_i} = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \right) \quad (5.1),$$

nesta expressão, n refere-se ao número de medições realizadas e L_j ao nível sonoro medido correspondente a cada medição j . A avaliação do ruído de fundo permite apurar a necessidade de proceder à correcção de L_{med_i} mediante a verificação das seguintes condições:

- i) Se o nível sonoro produzido pelo ruído de fundo for inferior em 15 dB ao nível sonoro medido considerando a fonte e o ruído de fundo, não se fazem correcções.
- ii) Se a diferença entre estes dois níveis for inferior a 15 dB e superior a 6 dB deve ser calculado o nível sonoro corrigido da seguinte forma:

$$L = 10 \log(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10}) \quad (5.2),$$

em que L (dB) se refere ao nível médio corrigido para a banda de frequência em análise, L_{sb} (dB) ao nível sonoro médio com a fonte a funcionar e L_b (dB) ao nível sonoro médio produzido pelo ruído de fundo, *i.e.*, sem a fonte a funcionar.

- iii) Se a diferença entre níveis for menor ou igual a 6 dB, em qualquer das bandas de frequência, deverá ser efectuada uma correcção de forma a subtrair 1.3 dB ao nível sonoro medido com a fonte em funcionamento.

O nível sonoro normalizado, L_n (dB), para cada banda de frequência é calculado através de:

$$L_n = L_i + 10 \log \frac{A}{A_0} \quad (5.3),$$

nesta expressão, L_i (dB) corresponde ao nível sonoro médio corrigido pelo ruído de fundo, A (m^2) à área de absorção sonora equivalente e $A_0=10 m^2$ à área de absorção equivalente de referência.

Para efeitos da avaliação do índice de redução da transmissão de sons de percussão, ΔL_w (dB), registou-se o nível sonoro no interior da câmara receptora, com a máquina de percussão a actuar directamente na laje de referência do ITeCons, $L_{n,0}$ (dB), e o nível sonoro de percussão no interior da câmara receptora, L_n (dB), com a lajeta de ECG (M150, M250 e M400), sobre a laje de referência do ITeCons e como solução de lajeta flutuante. O campo sonoro foi gerado pela máquina de percussão normalizada que, para cada ensaio, foi colocada em 4 posições distintas sobre a superfície dos pavimentos. Foram ainda medidos os tempos de

reverberação na câmara receptora num total de 6 decaimentos, em 3 posições de microfone e uma posição da fonte de ruído aéreo, de acordo com as indicações da norma NP EN ISO 354:2007 [44].

A redução da transmissão de sons de percussão produzida pelo revestimento de piso, ΔL (dB), corresponde à diferença entre os níveis sonoros normalizados da laje ensaiada sem o revestimento aplicado, $L_{n,0}$, e da laje ensaiada com o revestimento aplicado, L_n , *i.e.*,

$$\Delta L = L_{n,0} - L_n \quad (5.4).$$

Para cada banda de frequência, determina-se o nível sonoro normalizado do pavimento de referência com o revestimento aplicado, $L_{n,r}$ (dB), de acordo com a seguinte expressão:

$$L_{n,r} = L_{n,r,0} - \Delta L \quad (5.5),$$

onde $L_{n,r,0}$ é o nível sonoro de referência de acordo com a Tabela 5.1.

O índice de isolamento sonoro do pavimento de referência com o revestimento aplicado, $L_{n,r,w}$ (dB), é determinado através da comparação da curva resultante das medições com a curva $L_{n,r}$ (dB), definida para o intervalo de frequência compreendido entre 100 e 3150 Hz, cujas ordenadas se apresentam na Tabela 5.1. A curva de referência é translacionada verticalmente, em intervalos de 1 dB, de forma a que a soma dos desvios desfavoráveis, nas bandas de um terço de oitava, seja o maior possível, mas nunca superior 32 dB. Um desvio desfavorável ocorre numa determinada banda de frequência quando o resultado da medição excede o valor de referência.

Tabela 5.1 - Curva de referência, de acordo com a norma NP EN ISO 717-2:2006 [43].

Frequência (Hz) (*)	100	125	160	200	250	315	400	500
Valores de referência (dB)	62	62	62	62	62	62	61	60
Frequência (Hz) (*)	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Valores de referência (dB)	59	58	57	54	51	48	45	42

(*) Bandas de um terço de oitava.

O valor do índice de isolamento sonoro do pavimento de referência com o revestimento aplicado, $L_{n,r,w}$, corresponde à ordenada da curva de referência na abcissa de 500 Hz. O índice de redução da transmissão de sons de percussão produzida pelo revestimento de piso, ΔL_w é determinado por:

$$\Delta L_w = 78 - L_{n,r,w} \quad (5.6).$$

De acordo com a norma NP EN ISO 717-2:2006 [43], é ainda necessário determinar o termo de adaptação, $C_{I,r}$, para o pavimento de referência, considerando o revestimento de piso aplicado. A determinação de $C_{I,r}$ (dB) envolve a soma, numa base energética, dos resultados da medição do nível sonoro normalizado, $L_{n,r}$, nas bandas de terço de oitava entre 100 Hz e 2500 Hz, de acordo com:

$$L_{n,r,sum} = 10 \log \left(\sum_{j=1}^k 10^{L_{n,r,j}/10} \right) \quad (5.7),$$

nesta expressão, $L_{n,r,j}$ corresponde ao nível sonoro na banda de terço de oitava j . O termo de adaptação, $C_{I,r}$, é determinado através de:

$$C_{I,r} = L_{n,r,sum} - 15 - L_{n,r,w} \quad (5.8).$$

5.2.1.2 Preparação de Provetes e Equipamentos de Ensaio

Na avaliação do desempenho ao isolamento sonoro a sons de percussão dos sistemas de pavimentos, utilizaram-se provetes de menores dimensões do que as preconizadas pela norma EN ISO 10140-3. 2010 [42]. Ainda que os provetes usados não sejam normalizados, é possível comparar, entre si, os resultados dos ensaios das várias soluções avaliadas. Assim, moldaram-se nove provetes das betonilhas com ECG (M150, M250 e M400), cada um com área $1.20 \times 1.20 \text{ m}^2$. Para cada amostra (M150, M250 e M400), testaram-se três espessuras, *i.e.* 1.5, 3.0 e 4.5 cm. Os provetes foram fabricados e curados nas condições de temperatura e humidade relativa definidas no Capítulo 2, tendo os ensaios sido realizados decorridos 28 dias após o seu fabrico.

Foram testadas duas soluções de pavimento: numa, cada provete foi colocado sobre a laje de referência do ITeCons⁴, simulando um sistema de pavimento em que a betonilha leve é aplicada como revestimento aparente, sistema RA (Figura 5.1), e, na outra, cada provete foi colocado sobre a laje de referência do ITeCons e sob uma lajeta de betão armado de espessura 0.03 m, simulando um sistema de pavimento com lajeta flutuante sobre a betonilha leve, sistema I (Figura 5.2). Na solução que simula o sistema de pavimento com lajeta flutuante, testou-se, ainda, uma camada constituída por uma mistura de grânulos de cortiça com 50% de ECG 3/5 e

⁴ A descrição da laje de referência do ITeCons é feita no Capítulo 4.

50% de ECG 5/10 (ECG 3/5+5/10)⁵, colocada entre a laje de referência do ITeCons e a lajeta de betão, tal como é esquematizado na Figura 5.3.

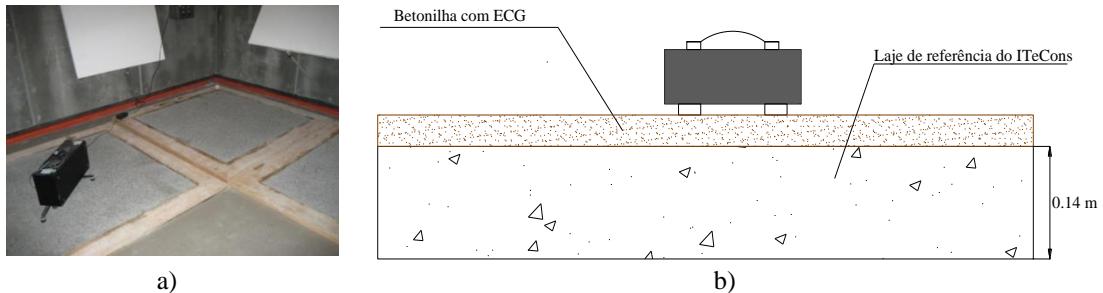


Figura 5.1 - Provete colocado sobre a laje de referência do ITeCons, simulando um sistema de pavimento em que a betonilha leve é aplicada como revestimento aparente (RA): a) Ensaio de percussão no interior da câmara vertical emissora; b) Representação esquemática.

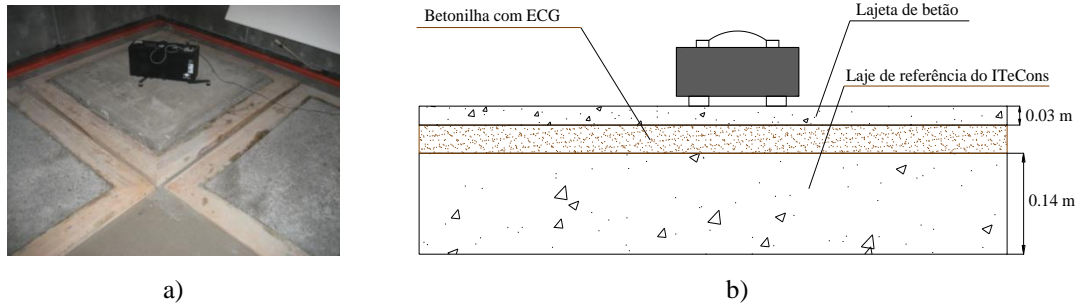


Figura 5.2 – Provete colocado sobre a laje de referência do ITeCons e sob uma lajeta de betão de espessura 0.03 m, simulando um sistema de pavimento com lajeta flutuante sobre a betonilha leve (I): a) Ensaio de percussão; b) Representação esquemática.

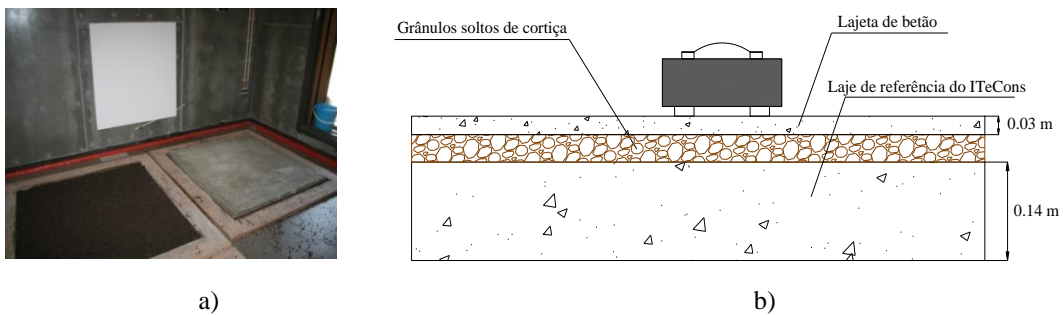


Figura 5.3 – Mistura de granulados de cortiça expandida solta (ECG 3/5+5/10) aplicada sobre a laje de referência do ITeCons e sob uma lajeta de betão, simulando um sistema de pavimento com lajeta flutuante sobre grânulos de cortiça (I): a) Ensaio de percussão; b) Representação esquemática.

Para além das câmaras acústicas e da laje de referência do ITeCons, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Gerador de sinais *Briuel&Kjaer*, modelo 3560-C-T46;

⁵ Mistura de ECG que integra as betonilhas leves e que também é referida no Capítulo 3.

- Amplificador *Brüel&Kjær*, referência 2716;
- Calibrador acústico do tipo 1, conforme definido na norma IEC 942;
- Microfone *Brüel & Kjær*, referência 4190 e dispositivo rotativo *Brüel & Kjær*, referência 3923;
- Fonte sonora omnidireccional, *Brüel & Kjær*, referência 4292 e máquina de percussão, *Brüel & Kjær*, referência 3207.
- Termo-higrómetro.

5.2.1.3 Apresentação e Análise de Resultados

As curvas que representam a redução da transmissão de sons de percussão, ΔL , correspondentes às soluções que simulam o sistema de pavimento com a betonilha leve (M150, M250 e M400) no revestimento aparente das betonilhas (RA), estão representadas nos gráficos da Figura 5.4 e os correspondentes valores dos índices de redução sonora a sons de percussão, ΔL_w , na Tabela 5.2.

A análise dos resultados, relativos às lajetas de 1.5 cm de espessura, permite afirmar que o melhor desempenho ao isolamento a sons de percussão se verifica na betonilha M150 ($\Delta L_w=25$ dB). Para a mesma espessura, o menor valor de ΔL_w corresponde à betonilha M400 ($\Delta L_w=21$ dB).

A Figura 5.4 b) indicia ser a betonilha M150 a que apresenta melhor desempenho de isolamento a sons de percussão, para a espessura de 3.0 cm, o que é confirmado pelo correspondente valor $\Delta L_w=29$ dB. A betonilha que se revela menos eficiente, na mesma espessura, é M400 com $\Delta L_w=19$ dB, o que também pode ser facilmente comprovado através da análise da curva ΔL representadas na mesma figura.

A análise das curvas de ΔL , na espessura de 4.5 cm, representadas na Figura 5.4 c), prenuncia que M150 possa ser a betonilha mais conveniente para o isolamento a sons de percussão. No entanto, os valores de ΔL_w representados na Tabela 5.2 revelam que as betonilhas M150 e M250 apresentam idêntico valor do índice de redução aos sons de percussão, *i.e.* $\Delta L_w=22$ dB.

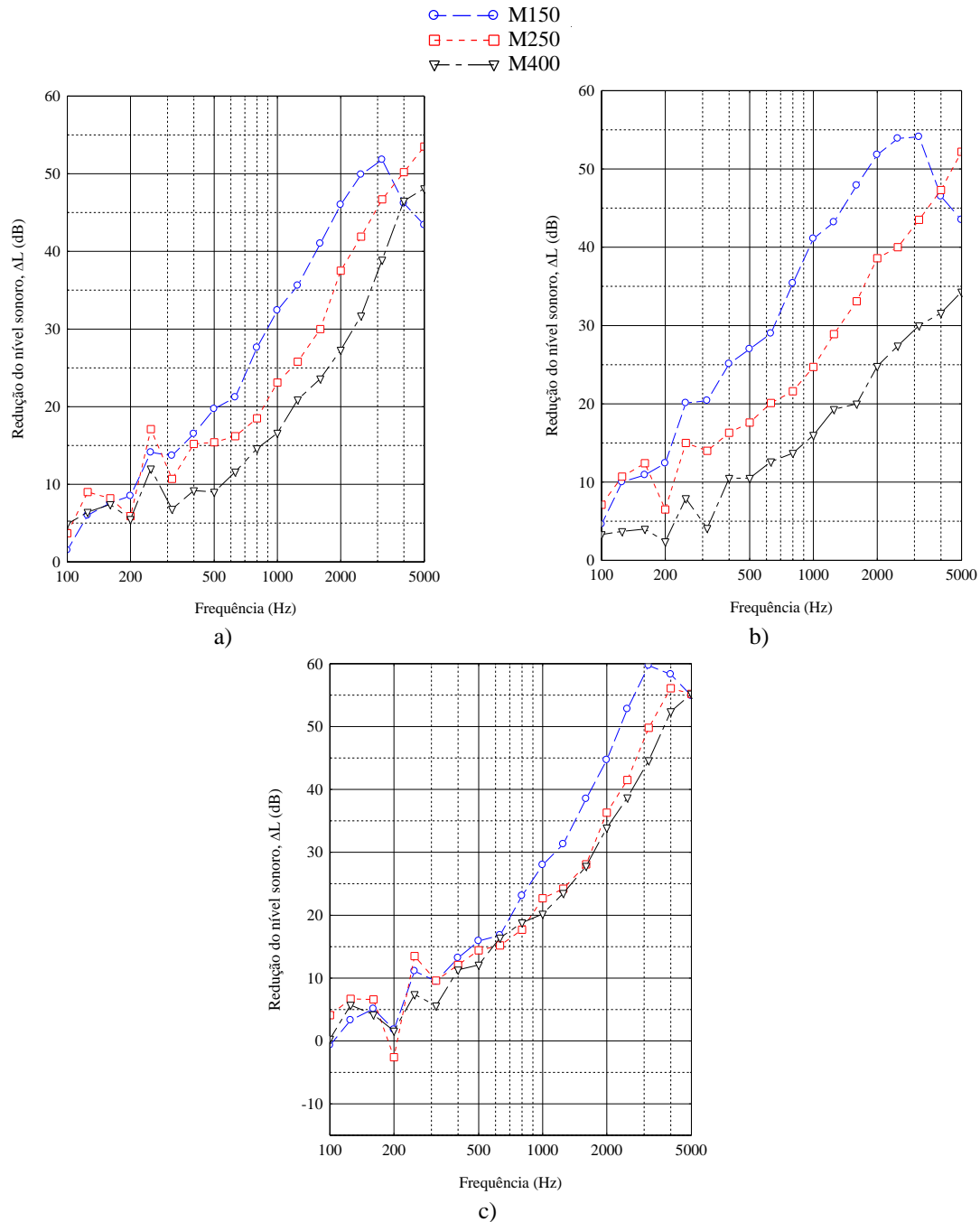


Figura 5.4 - Redução da transmissão de sons de percussão, ΔL , produzida pela solução que simula um sistema de pavimento com a betonilha leve (M150, M250 e M400) como revestimento aparente (RA): a) Espessura 1.5 cm; b) Espessura 3.0 cm; c) Espessura 4.5 cm.

Tabela 5.2 - Índice de redução da transmissão de sons de percussão, ΔL_w , da solução simula um sistema de pavimento com as betonilhas leves (M150, M250 e M400) como revestimento aparente (RA).

Revestimento aparente (RA)	ΔL_w (dB)		
	Espessura (cm)		
	1.5	3.0	4.5
M150	25	29	22
M250	24	27	22
M400	21	19	20

As curvas ΔL exibidas nos gráficos da Figura 5.5 e os resultados listados na Tabela 5.3 referem-se aos ensaios de isolamento sonoro realizados da solução que simula o sistema de pavimento com lajeta flutuante sobre as betonilhas leves (M150, M250, M400) e a mistura de grânulos de cortiça (ECG(3/5+5/10)).

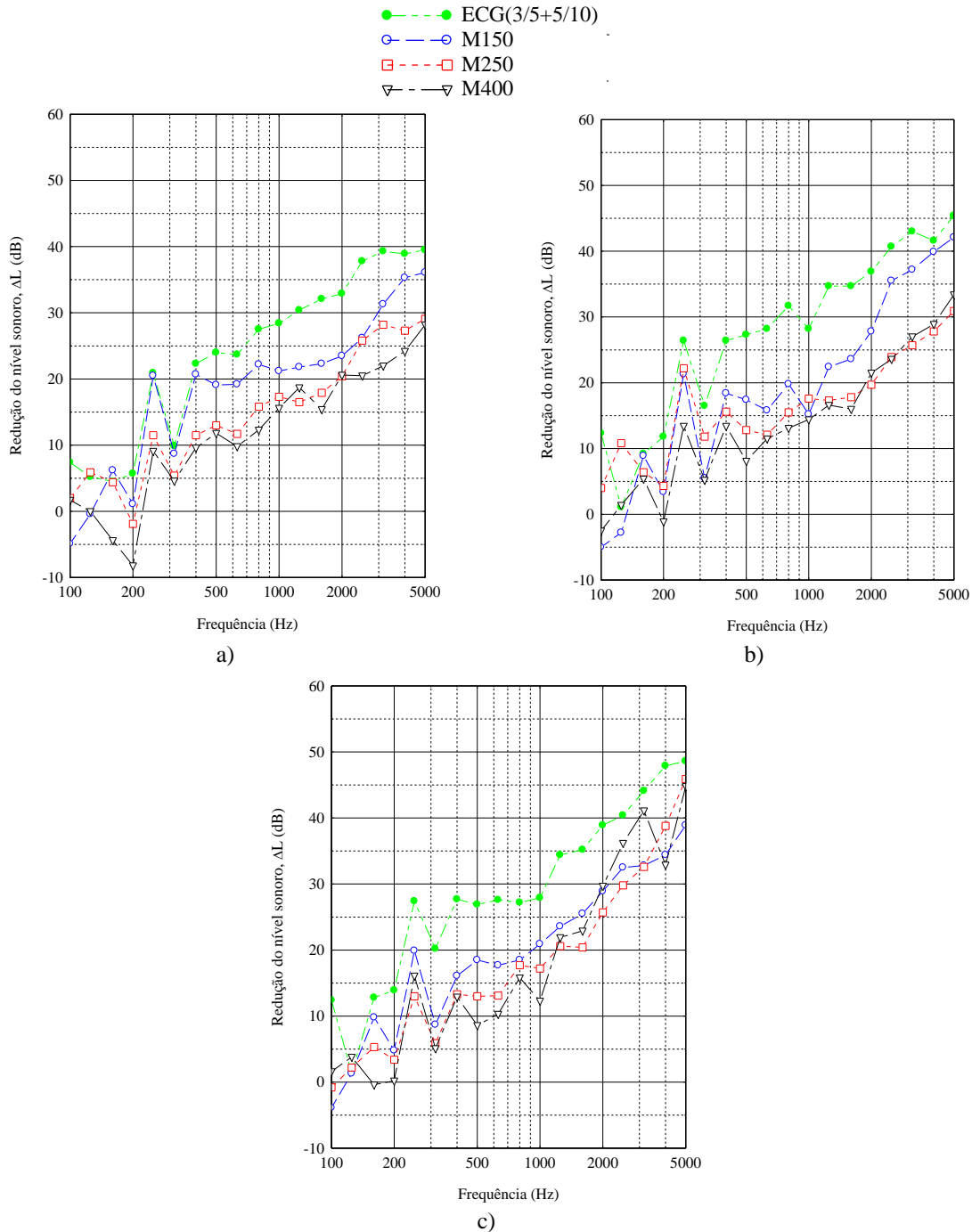


Figura 5.5 - Redução da transmissão de sons de percussão, ΔL , produzida pela solução que simula um pavimento com lajeta flutuante sobre a betonilha leve (M150, M250 e M400) e sobre a mistura de grânulos de cortiça [ECG(3/5+5/10)] (I) : a) Espessura 1.5cm; b) Espessura 3.0 cm; c) Espessura 4.5 cm.

Tabela 5.3 - Índice de redução da transmissão de sons de percussão, ΔL_w , dos pavimentos flutuantes.

Camada intermédia (I)	ΔL_w (dB)		
	Espessura (cm)		
	1.5	3.0	4.5
M150	19	19	22
M250	18	19	20
M400	14	17	18
ECG(3/5+5/10)	24	28	30

Através da análise dos resultados listados na Tabela 5.3 e das curvas ΔL da Figura 5.5, é possível afirmar que o sistema de pavimento flutuante que integra a camada intermédia ECG(3/5+5/10) é a solução que se revela mais eficiente perante todas as espessuras testadas. Tal como seria expectável, é para a espessura de 4.5 cm que se obtém o valor máximo do índice de redução sonora aos sons de percussão, ou seja $\Delta L_w=30\text{dB}$, enquanto o menor valor, $\Delta L_w=24\text{dB}$, se regista para a espessura de 1.5 cm.

A partir da comparação dos resultados apresentados nas Tabelas 5.2 e 5.3, relativamente aos sistemas de pavimentos estudados, é possível afirmar que a utilização de ECG na forma solta, ECG(3/5+5/10), e na espessura de 4.5 cm, na camada intermédia do pavimento (*i.e.* sob a lajeta de betão), é a solução mais eficiente para o isolamento aos sons de percussão ($\Delta L_w=30\text{dB}$). Esta melhoria do desempenho, relativamente ao isolamento a sons de percussão, poderá ter uma explicação no facto do material granular ser descontínuo, *i.e.* conter ar entre os grânulos soltos, e a velocidade de propagação do som ser significativamente menor. Quanto maior for a espessura da camada de grânulos de cortiça, maior é a redução da transmissão sonora.

Nos gráficos das Figuras 5.6 a 5.8, é possível comparar o desempenho ao isolamento sonoro a sons de percussão entre o sistema de pavimento com as betonilhas leves aplicadas como revestimento aparente (RA) e o sistema de pavimento com lajeta flutuante sobre as betonilhas leves e a mistura de grânulos de cortiça (I).

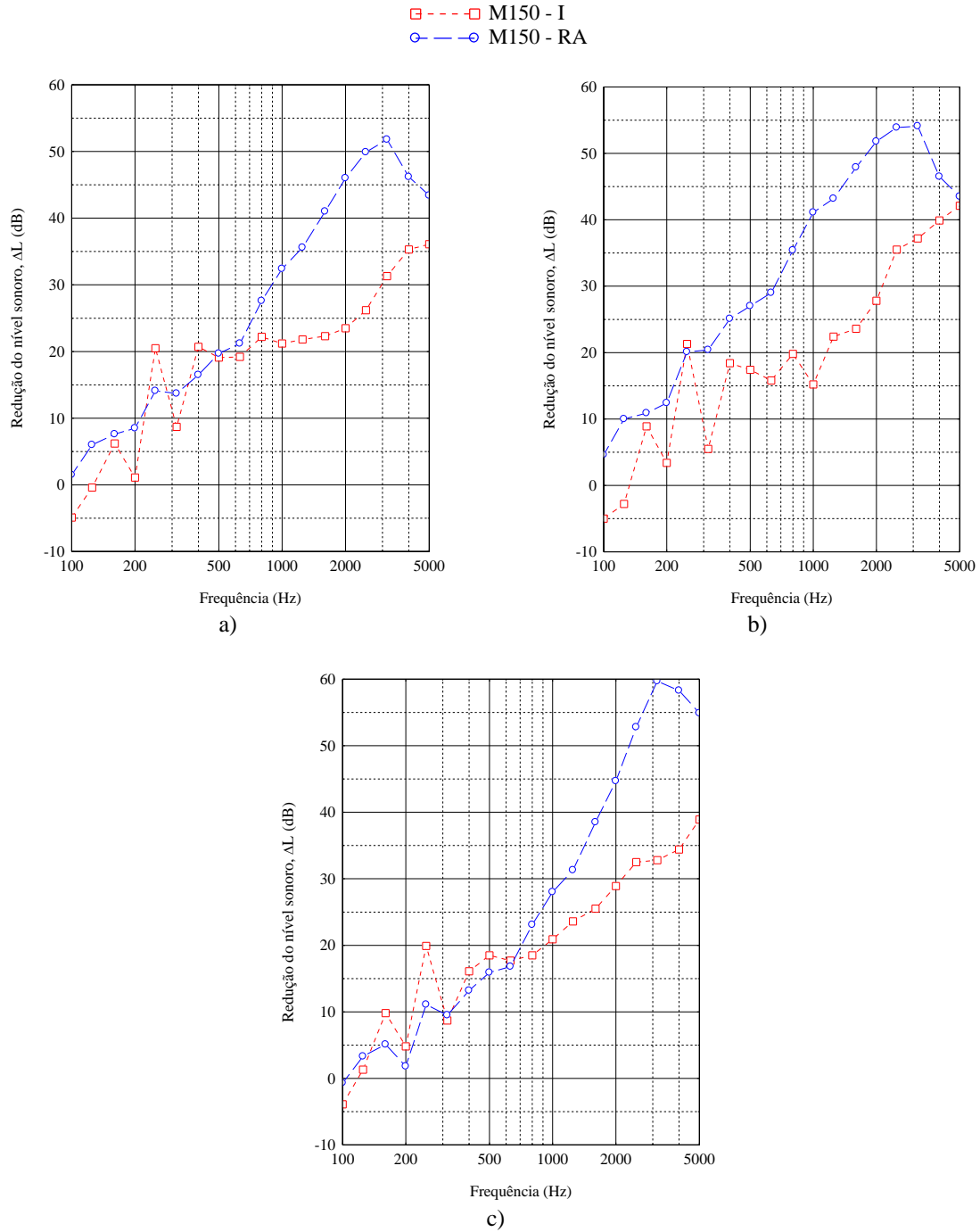


Figura 5.6 – Comparação da redução da transmissão de sons de percussão, ΔL , entre o sistema de pavimento que integra M150 como revestimento aparente (RA) e o sistema de pavimento com a lajeta flutuante sobre M150 (I): a) Espessura 1.5cm; b) Espessura 3.0 cm; c) Espessura 4.5 cm.

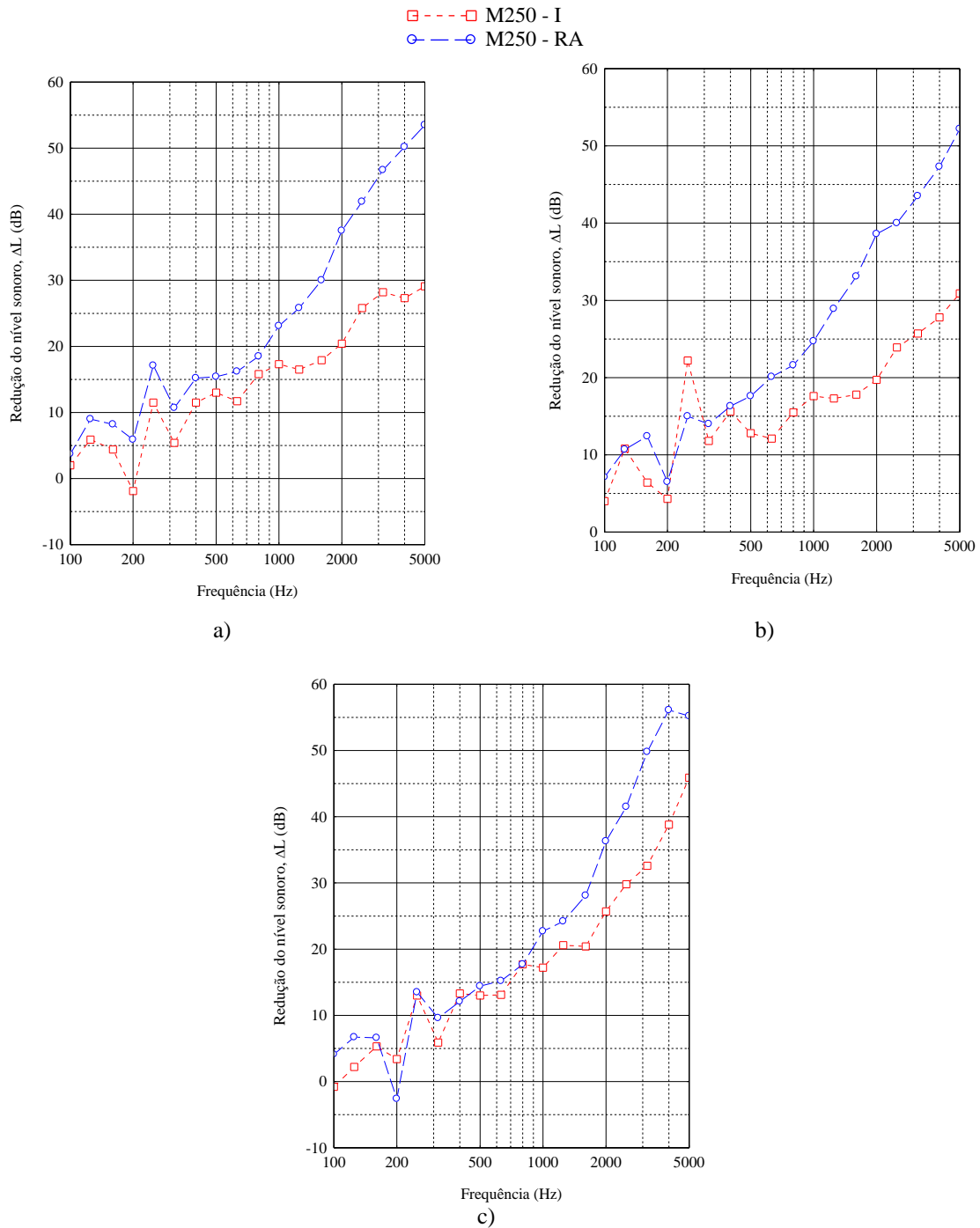


Figura 5.7 - Comparação da redução da transmissão de sons de percussão, ΔL , entre o sistema de pavimento que integra M250 como revestimento aparente (RA) e o sistema de pavimento com a lajeta flutuante sobre M250 (I a) Espessura 1.5cm; b) Espessura 3.0 cm; c) Espessura 4.5 cm.

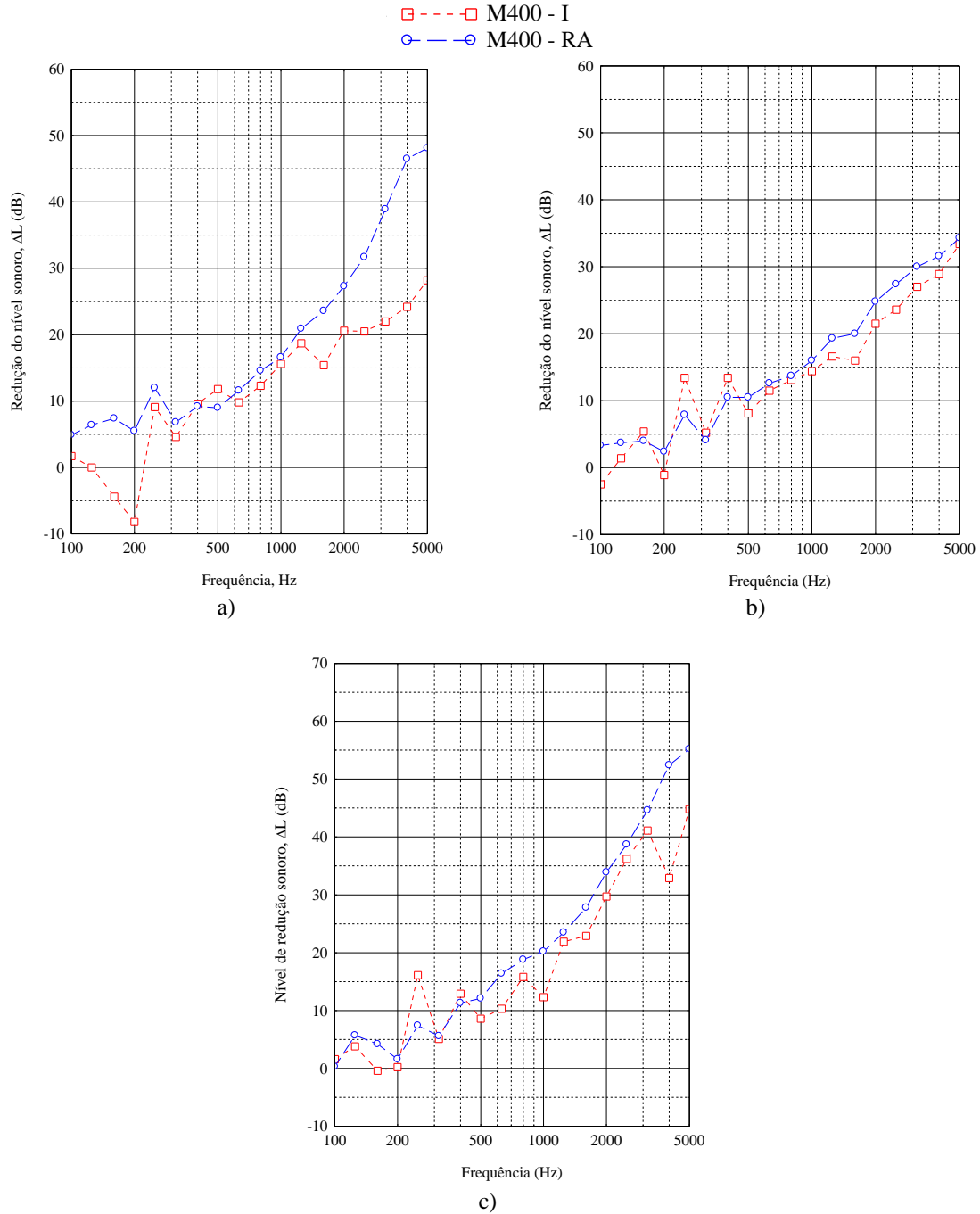


Figura 5.8 - Comparação da redução da transmissão de sons de percussão, ΔL , entre o sistema de pavimento que integra M400 como revestimento aparente (RA) e o sistema de pavimento com a lajeta flutuante sobre M400 (I): a) Espessura 1.5cm; b) Espessura 3.0 cm; c) Espessura 4.5 cm.

A aplicação das betonilhas com ECG, como revestimento aparente dos sistemas de pavimento, revela-se mais eficiente na redução do nível sonoro aos sons de percussão do que quando as mesmas são colocadas na camada intermédia dos sistemas de pavimento, *i.e.* sob a lajeta flutuante. Estas diferenças de desempenho são mais evidentes no caso dos sistemas de pavimento que integram M150 e M250 do que no que integra M400, o que se explica pelo facto de esta betonilha ser mais rígida (pela maior quantidade de cimento) do que M150 e M250. Interessa referir que, particularmente, nos casos das betonilhas M150 e M250⁶ é recomendável a aplicação de um revestimento superficial. A aplicação do referido revestimento superficial poderá, no entanto, melhorar a transmissão dos sons de percussão e, conseqüentemente, os resultados apresentados.

Apesar da utilização da camada de grânulos soltos, ECG(3/5+5/10), no sistema de pavimento com a lajeta flutuante se revelar a solução mais eficiente, quando o material é aplicado como revestimento de piso, é a betonilha M150 que apresenta os melhores resultados, designadamente nas espessuras, 1.5 e 3.0 cm.

5.2.2 Determinação Experimental da Rigidez Dinâmica Aparente, s'_t

A norma ISO 9052-1:1989 [25] estabelece a metodologia para a determinação experimental da rigidez dinâmica aparente de materiais resilientes. O ensaio proposto por esta norma baseia-se no modelo simplificado desenvolvido por Cremer *et al.* [45], através do qual o pavimento flutuante é representado por um sistema massa-mola, no qual a camada resiliente é a mola e a lajeta flutuante a massa. A rigidez dinâmica aparente, s'_t , por unidade de área de amostra, é determinada através da quantificação da frequência fundamental de ressonância da vibração vertical do sistema massa-mola, através do designado método da ressonância. A frequência fundamental de ressonância, f_0 (Hz), é determinada através da seguinte expressão:

$$s'_t = 4\pi^2 \cdot m'_t \cdot f_0^2 \quad (5.9),$$

em que s'_t (MN/m³) corresponde à rigidez dinâmica aparente e m'_t (kg/m²) à massa total do provete por unidade de área.

Para o presente trabalho, determinou-se a rigidez dinâmica aparente, s'_t , das betonilhas M150, M250 e M400 nas espessuras 1.5, 3.0 e 4.5 cm. Determinou-se igualmente a rigidez dinâmica aparente da mistura grânulos de cortiça, na forma solta, ECG(3/5+5/10). Seguidamente, descrevem-se a preparação dos provetes, bem como os procedimentos adoptados para a realização do ensaio. Finalmente, analisam-se e discutem-se os resultados e procede-se à sua comparação com os resultados dos ensaios de percussão realizados nas lajetas.

⁶ Perante os resultados de resistência mecânica apresentados no Capítulo 2.

5.2.2.1 Preparação de Provetes e Descrição dos Procedimentos de Ensaio

A norma ISO 9052-1:1989 [25] estabelece que o ensaio deve ser realizado com o recurso a três provetes com área $200 \times 200 \text{ mm}^2$. Sobre cada provete é aplicada uma película de polietileno e, posteriormente, uma camada de pasta de gesso com, pelo menos, 5 mm de espessura. Antes da pasta de gesso iniciar o processo de presa, deve-se colocar uma placa de carga $(200 \pm 3) \times (200 \pm 3) \text{ mm}^2$ de massa $8 \pm 0.5 \text{ kg}$. A aplicação da camada de gesso permite regularizar a superfície da amostra e a sua ligação à placa de carga. Após o período de estabilização dos provetes $(24 \pm 2 \text{ h})^7$, estes são colocados sobre uma base de inércia elevada, para que a velocidade de vibração desta não influencie os resultados, *i.e.*, em vibração, a aceleração da base seja desprezível em relação à da placa de carga.

Os dispositivos de medição usados neste ensaio foram os seguintes (Figura 5.9):

- Martelo de impacto *Brüel & Kjær*, do tipo 8206;
- Computador portátil;
- Acelerómetro *Brüel & Kjær*, do tipo 4370 e pré-amplificador *Brüel & Kjær*, do tipo 2646;
- Sistema Multianalisador Pulse TM *Brüel & Kjær*, modelo 3560-C.



Figura 5.9 - Dispositivos de ensaio para a determinação experimental da rigidez dinâmica.

O ensaio consiste na excitação do sistema, através de impactos produzidos por um martelo, em quatro pontos distintos. A aplicação dos impactos deve ser realizada na zona central da placa para que apenas se produzam vibrações verticais.

As vibrações são medidas através de um acelerómetro, colocado no centro da placa de carga, como se ilustra na Figura 5.9. Os impactos, provocados durante um determinado período de tempo, devem ter força e cadência constantes. O transdutor incorporado no martelo regista a

⁷ Para se garantir a cura completa da camada de gesso.

força de cada impacto, enquanto o acelerómetro regista a aceleração produzida no sistema. Para cada betonilha e para cada espessura, foram ensaiados três provetes distintos.

Quando a solicitação do sistema é realizada através de impacto, a norma ISO 9052-1:1989 [25] estabelece que o tratamento de dados seja realizado de acordo com a metodologia descrita na norma ISO 7626-5:1994 [46]. Esta norma descreve o procedimento a seguir, no caso da resposta no domínio da frequência de estruturas excitadas por forças impulsivas externas à estrutura.

5.2.2.2 Apresentação e Análise de Resultados

No caso em estudo, os dispositivos de ensaio registaram acelerações e forças. A função resposta em frequência traduz a resposta do sistema à força aplicada, em função da frequência, pelo que a função de transferência será o quociente entre a aceleração e a força, *i.e.*, a acelerância. Desta forma, a função de transferência, no domínio da frequência, permite identificar a frequência para a qual ocorre a ressonância do sistema.

A função de coerência é uma medida de correlação entre a força aplicada e a aceleração para cada frequência. Esta função está compreendida entre 0 e 1, sendo que os valores próximos da unidade indicam que existe uma correlação adequada entre a força e a aceleração.

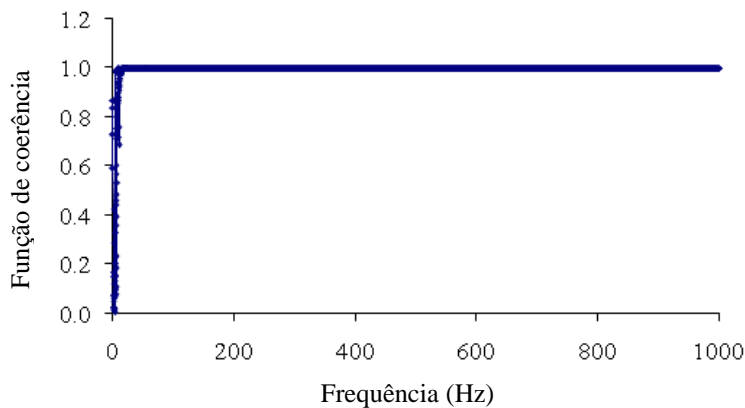


Figura 5.10 – Função de coerência que permite assegurar que os resultados do ensaio de avaliação de rigidez dinâmica aparente são válidos.

Na Figura 5.10, apresenta-se um exemplo da função de coerência que permite assegurar que os resultados dos ensaios apresentados na Tabela 5.4 são válidos. Nas Figuras 5.11 a), b) e c) representam-se apenas as funções de transferência, correspondentes às amostras com 3 cm de espessura, das betonilhas M150, M250 e M400, respectivamente. A frequência fundamental de ressonância corresponde ao valor de pico da função de transferência. No entanto, os valores que

se listam na Tabela 5.4 correspondem à média dos valores obtidos nos 4 pontos testados em cada um dos três provetes de cada amostra.

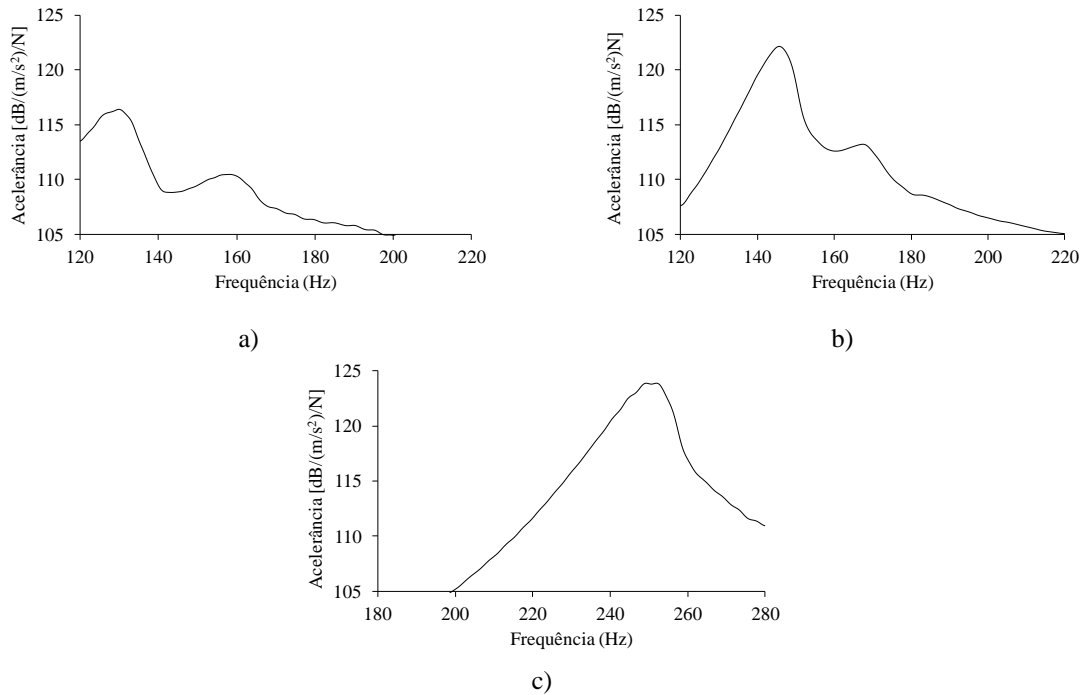


Figura 5.11 – Funções de transferência, no domínio da frequência, das amostras com 3.0 cm de espessura: a) M150; b) M250; c) M400.

Tabela 5.4 - Frequência de ressonância, f_0 (Hz), e rigidez dinâmica aparente, s'_t (MN/m³) das amostras das betonilhas M150, M250, M400 e de ECG(3/5+5/10).

Amostra	Espessura (cm)	Frequência de Ressonância (Hz)	s'_t (MN/m ³)
M150	1.5	137.11	159.97
	3.0	127.43	148.75
	4.5	155.10	228.06
M250	1.5	154.54	206.43
	3.0	145.01	191.17
	4.5	204.52	405.00
M400	1.5	234.38	481.70
	3.0	246.03	576.59
	4.5	242.89	599.56
ECG(3/5+5/10)	1.5	79.43	52.95
	3.0	63.62	32.96
	4.5	42.04	14.74

A partir da análise dos resultados apresentados na Tabela 5.4, o sistema constituído pela mistura de ECG, na forma solta, constitui a solução com a menor rigidez dinâmica nas três espessuras testadas. Consta-se, igualmente, e como seria de esperar, que quanto maior é a espessura do estrato ECG(3/5+5/10), tanto menor é a rigidez dinâmica aparente.

No que se refere aos sistemas que integram as betonilhas com ECG, verifica-se que a rigidez dinâmica aparente aumenta com a quantidade de cimento das betonilhas. As betonilhas M150 e M250 apresentam a menor rigidez dinâmica para a espessura de 3.0 cm ($s'_t=148.75$ MN/m³ e $s'_t=191.17$ MN/m³, respectivamente), enquanto a betonilha M400 apresenta o menor valor na espessura de 1.5 cm ($s'_t=481.70$ MN/m³).

5.2.3 Discussão dos Resultados Experimentais

A rigidez dinâmica aparente das betonilhas, M150, M250 e M400, apresenta valores mais elevados dos que os dos materiais resilientes habitualmente usados em sistemas de pavimentos flutuantes. Os resultados de s'_t podem, em geral, relacionar-se com os da ΔL_w , *i.e.* valores reduzidos de s'_t correspondem a valores elevados de ΔL_w . Os resultados da Tabela 5.4 revelam que a rigidez dinâmica aparente de ECG(3/5+5/10) é significativamente menor do que a das betonilhas M150, M250 e M400, para as mesmas espessuras, o que traduz a maior eficiência, em termos do isolamento a sons de percussão, do sistema de pavimento que integra a mistura solta de granulados de cortiça. A redução da rigidez dinâmica, à medida que se aumenta a espessura da amostra de ECG(3/5+5/10), está em consonância com os resultados do ensaio de percussão (Tabela 5.3).

No que se refere às betonilhas com ECG, os menores valores de s'_t correspondem a M150 com a espessura de 3.0 cm; este resultado é concordante com o do ensaio de percussão do sistema de pavimento com a betonilha, na mesma espessura, aplicada como revestimento de piso (Tabela 5.2), com o qual se obtém o maior valor ΔL_w (=29 dB). Nas restantes espessuras de M150 existe correspondência entre os maiores valores de ΔL_w e os menores valores de s'_t . A betonilha M250 apresenta o mesmo comportamento de M150, *i.e.* o menor valor de s'_t (Tabela 5.4) e o maior valor de ΔL_w (Tabela 5.2) correspondem à espessura de 3.0 cm; e para as restantes espessuras também se verifica o mesmo tipo de correspondência entre os valores s'_t e de ΔL_w . De acordo com os resultados obtidos, M400 regista os maiores valores de s'_t que aumentam com o aumento de espessura; para a espessura de 1.5 cm, obtém-se o valor mais reduzido de s'_t para esta betonilha que corresponde também ao maior valor de ΔL_w (Tabela 5.2); para as espessuras de 3.0 e 4.5 cm esta relação não é tão evidente.

Os resultados dos ensaios de percussão dos sistemas de pavimento que integram as betonilhas, M150, M250 e M400, na camada intermédia (Tabela 5.3) não evidenciam correspondência entre os menores valores de s'_t e os maiores valores de ΔL_w . Interessa salientar que estes sistemas de pavimentos apresentam similaridade de resultados entre as espessuras, das mesmas amostras, excepto para M400, na espessura de 1.5 cm. Este facto pode ser devido à carga da lajeta flutuante de betão sobre as betonilhas e também devido à rigidez da superfície da mesma lajeta.

5.3 MODELO ANALÍTICO

Seguidamente, procede-se à aplicação de um modelo analítico destinado à previsão da redução sonora a sons de impacto, cuja formulação se apresenta no anexo. O modelo é definido para sistemas constituídos por camadas fluidas e sólidas de dimensões infinitas, através de funções de Bessel, sendo o sistema excitado por uma carga na camada sólida. Sempre que um meio, fluido ou elástico, é solicitado por uma fonte, ocorre uma propagação de energia através desse meio. No processo de transmissão são criadas ondas de pressão, se o meio for um fluido, e ondas de compressão e de corte, se o meio for um sólido. Em ambos os meios gerar-se-ão ainda ondas de superfície. O processo de propagação de energia compreende fenómenos de transmissão e de reflexão das ondas envolvidas.

Os resultados do modelo de previsão para meios fluidos e elásticos estratificados são comparados com os resultados dos ensaios de percussão apresentados na secção 5.1. Procede-se, ainda, à análise e comparação dos resultados obtidos.

5.3.1 Formulação do Problema

As simulações que se apresentam na presente secção referem-se à modelação do isolamento aos sons de percussão dos sistemas de pavimento avaliados experimentalmente, em termos do isolamento aos sons de percussão e cujos resultados se apresentaram na secção 5.2.1. O referido sistema é constituído por três camadas elásticas: uma laje de betão armado de 0.14 m de espessura (laje de referência do ITeCons), uma camada de betonilha com ECG (M150, M250 e M400) e uma lajeta de betão com 0.03 m de espessura. Os ensaios laboratoriais foram realizados para três espessuras da camada de betonilha com ECG, designadamente 1.5, 3.0 e 4.5 cm. Deste modo, as camadas elásticas do modelo analítico são constituídas por três estratos correspondentes à laje de referência do ITeCons com 0.14 m de espessura, à camada de forma constituída pela betonilha com ECG e à lajeta de betão com 0.03 m de espessura. O modelo

considera, ainda, duas camadas fluidas que circundam o pavimento e às quais se atribuem as propriedades do ar.

As camadas de ar, camadas fluidas, são caracterizadas pela massa volúmica, ρ_0^f , e pela velocidade de propagação das ondas longitudinais, α^f . As camadas sólidas, meios elásticos, são caracterizadas pela massa volúmica, ρ_0^S , pela velocidade de propagação das ondas longitudinais, α^S , pelo módulo de elasticidade transversal, μ , que permite velocidades de ondas transversais $\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_0}}$. As perdas internas no interior dos materiais são consideradas através da definição do módulo de elasticidade transversal como número complexo [47], $\mu = \mu_r(1 + i\eta)$, em que μ_r corresponde ao módulo de elasticidade clássico e η ao factor de perdas internas. Na Figura 5.12 representa-se esquematicamente o modelo usado.

O modelo analítico simula as respostas resultantes de uma força de impacto equivalente à de uma máquina de percussão normalizada que é constituída por cinco martelos posicionados ao longo de uma linha e igualmente espaçados entre si (cada martelo pesa 0.5 kg, percutindo a superfície com uma altura de queda de 0.04 m e com uma frequência de 10 Hz). A modelação da força produzida pela máquina de percussão considera a abordagem proposta por Cremer *et al.* [45], admitindo que a duração do choque é suficientemente curta no domínio do tempo, para que o pulso resultante possa ser considerado unitário, e que o impacto é perfeitamente elástico. Assim, o espectro da força de impacto é constante e tem uma amplitude de 8.854 N.

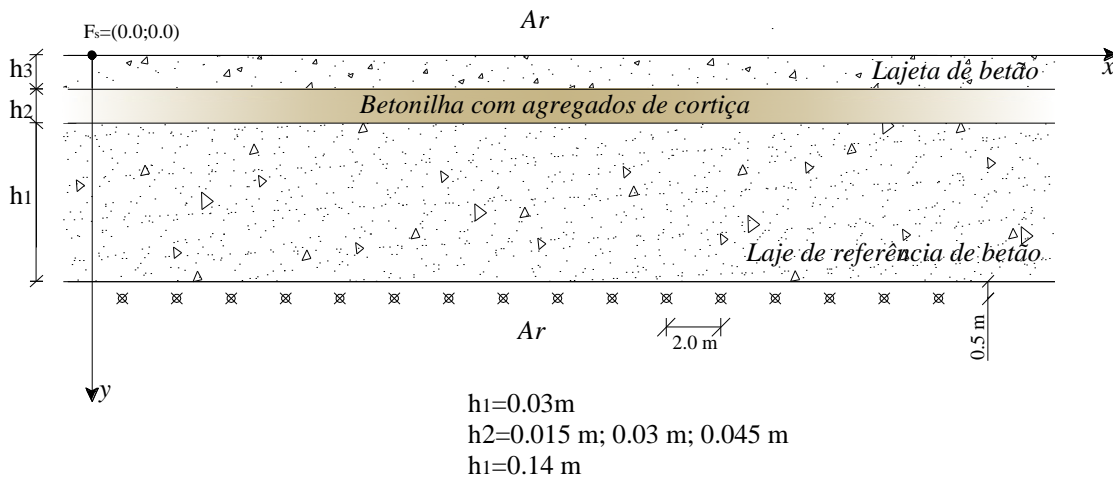


Figura 5.12 - Esquemática da geometria usada na simulação do isolamento a sons de percussão do pavimento constituído por uma laje de betão, uma camada de regularização constituída por uma betonilha com ECG e uma lajeta de betão.

As respostas são determinadas, admitindo que a carga unitária está localizada no meio elástico, em $F_s(0.0;0.0)$ m, actuando segundo a direcção y . Os receptores, pontos onde são determinadas as respostas, estão dispostos em linha, a 0.5 m da superfície de contacto

sólido-fluido, e encontram-se espaçados entre si de 2.0 m (Figura 5.12). Nos cálculos, utilizou-se um incremento de frequência de 2.0 Hz, abrangendo uma gama de frequências entre 100 e 5000 Hz. As propriedades dos materiais, introduzidas no modelo, estão indicadas na Tabela 5.5. A massa volúmica (ρ_0^S) e as velocidades das ondas longitudinais (α^S) e transversais (β^S) foram determinadas experimentalmente⁸. O factor de perdas interna (η) foi consultado na literatura da especialidade.

Tabela 5.5 – Propriedades dos materiais introduzidos no modelo analítico de simulação do sistema de pavimento com a camada intermédia constituída por uma betonilha com ECG.

		α (m/s)	μ_r (kPa)	ρ_0 (kg/m ³)	η (-)
Betão normal		3498.6	12.6×10^6	2500	6.00×10^{-3}
Betonilhas	M150	900.0	0.2×10^6	520	20.00×10^{-3}
	M250	1200.0	0.5×10^6	740	20.00×10^{-3}
	M400	1800.0	1.3×10^6	900	20.00×10^{-3}
Ar		340.0	-	1.2	-

5.3.2 Resultados Analíticos

Na Figura 5.13, expõem-se os resultados experimentais em bandas de um terço de oitava, referentes aos ensaios realizados com a máquina de percussão normalizada e apresentados na secção 5.2.1. Na mesma figura, representam-se também as curvas obtidas através do modelo analítico, resultante da modelação de uma força de impacto equivalente à de uma máquina de percussão normalizada. Os referidos resultados correspondem aos ensaios (linhas contínuas) e às modelações (linhas interrompidas) do sistema de pavimento que integra as betonilhas M150, M250 e M400, na camada sob a lajeta de betão (lajeta flutuante) e representam os seus desempenhos nas espessuras de 1.5, 3.0 e 4.5 cm.

⁸ A massa volúmica das betonilhas foi apresentada no Capítulo 2 e as velocidades das ondas longitudinais e transversais foram determinadas com o recurso a um dispositivo de ultrassons, *Pundit lab*, da marca comercial *Proceq*.

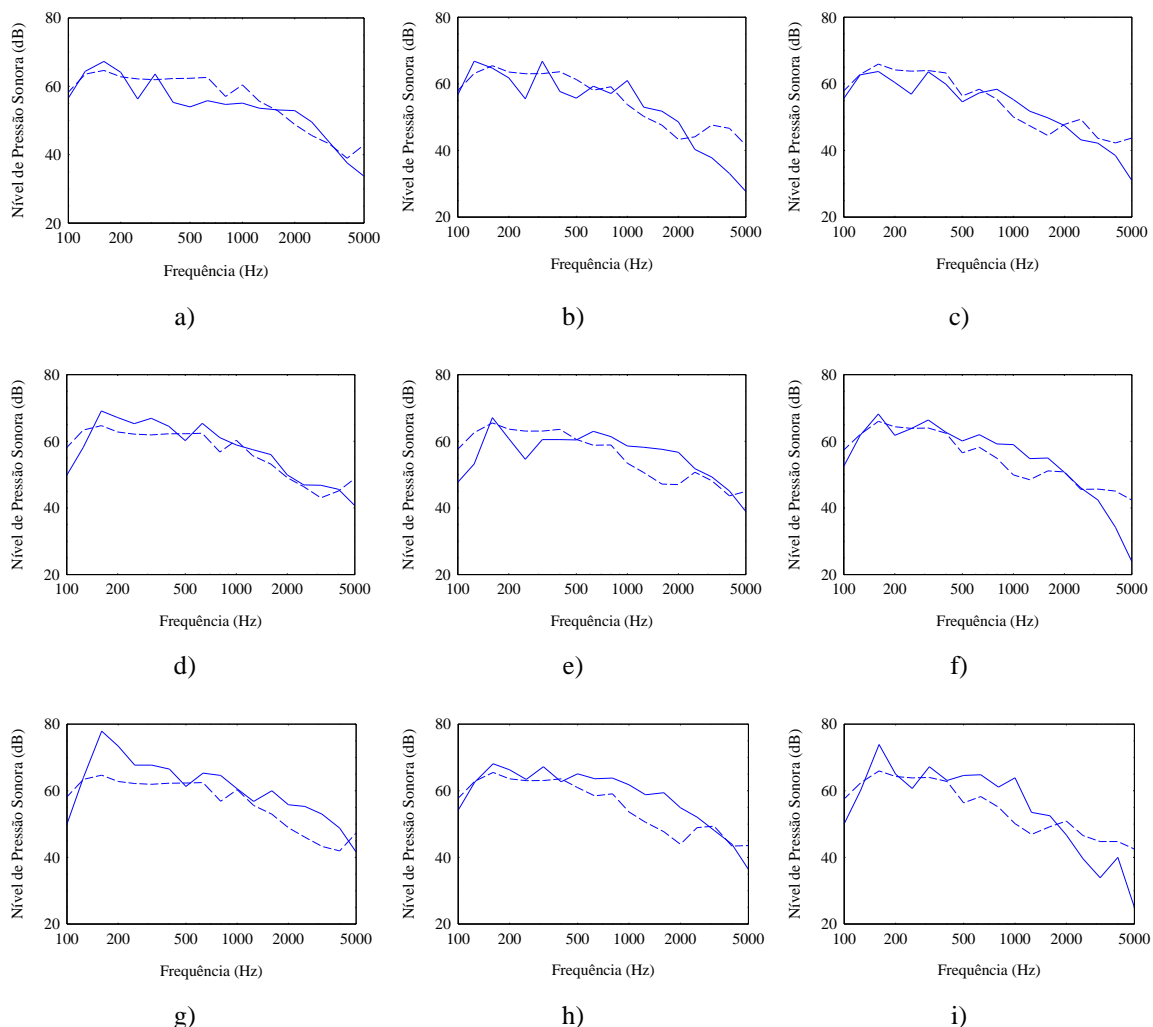


Figura 5.13 – Resultados analíticos (linha descontinua) e resultados experimentais (linha contínua) do nível sonoro de percussão na câmara receptora com o sistema de pavimento que integra a betonilha sob a lajeta de betão: a) M150 com 1.5 cm de espessura; b) M150 com 3.0 cm de espessura; c) M150 com 4.5cm de espessura; d) M250 com 1.5 cm de espessura; e) M250 com 3.0 cm de espessura; f) M250 com 4.5cm de espessura; g) M400 com 1.5 cm de espessura; h) M400 com 3.0 cm de espessura; i) M400 com 4.5cm de espessura.

A comparação dos resultados permite afirmar que, apesar dos materiais que integram as camadas do sistema de pavimento serem heterogéneas, e, designadamente as betonilhas com ECG, existe uma boa aproximação dos resultados obtidos por via analítica aos resultados obtidos experimentalmente. Interessa referir, ainda, que as câmaras acústicas verticais do ITeCons, onde os ensaios de percussão foram realizados, são genericamente caixas fechadas com modos próprios de vibração que não são considerados pelo modelo analítico utilizado, o que poderá explicar as pequenas diferenças verificadas entre as respostas analíticas e os resultados experimentais.

Considera-se, assim, que este modelo analítico poderá ser utilizado na previsão do isolamento sonoro a sons de percussão para outros sistemas construtivos que integrem este tipo

de betonilhas, nomeadamente sistemas em que as espessuras das várias camadas sejam diferentes.

5.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

No presente capítulo, avaliou-se o desempenho ao isolamento sonoro a sons de percussão de dois sistemas de pavimentos que integram as betonilhas com ECG, M150, M250 e M400. Num dos sistemas, as betonilhas leves são aplicadas sobre a laje de betão de referência com 0.14 m de espessura. No outro sistema, as betonilhas são interpostas entre a laje de referência de 0.14 m de espessura e uma lajeta de betão de 0.03 m de espessura. Os referidos sistemas de pavimentos foram avaliados para espessuras variáveis das betonilhas, designadamente 1.5, 3.0 e 4.5 cm. Realizaram-se ensaios para determinar o índice de redução da transmissão de sons de percussão usando, para o efeito, lajetas de 1.20×1.20 m² e, numa tentativa de relacionar a rigidez dinâmica aparente das betonilhas com o seu desempenho ao isolamento sonoro a sons de percussão, também se avaliou experimentalmente a rigidez dinâmica aparente das mesmas betonilhas, nas mesmas espessuras, em provetes 200×200 mm². Aplicou-se, ainda, um modelo analítico destinado à previsão da redução sonora a sons de percussão em meios estratificados, para avaliar se o mesmo é válido para os sistemas de pavimentos estudados.

Os resultados dos ensaios de percussão, apresentados na secção 5.2.1, permitem afirmar que, nos sistemas de pavimento que integram as betonilhas no revestimento, à medida que o teor de cimento aumenta, o índice de redução de transmissão de sons de percussão, ΔL_w , diminui. Neste caso, os melhores resultados com as betonilhas M150 e M250 obtêm-se para a espessura de 3.0 cm, enquanto para a betonilha M400, os valores de ΔL_w são similares nas três espessuras avaliadas. Os resultados de rigidez dinâmica, apresentados na secção 5.2.2, estão em consonância com os resultados dos ensaios de percussão, quando as betonilhas são aplicadas no revestimento. Considera-se, assim, que o ensaio de avaliação da rigidez dinâmica aparente normalizado, de materiais resilientes, com provetes de dimensões reduzidas (200×200 mm²) também pode ser usado para prever, em termos qualitativos, a eficiência das betonilhas com ECG no isolamento sonoro a sons de percussão, designadamente para espessuras diferentes das avaliadas no presente trabalho.

No sistema de pavimento em que as betonilhas são aplicadas sob a lajeta de betão, os valores de ΔL_w são inferiores ao do sistema de pavimento com as betonilhas no revestimento aparente, podendo-se afirmar que a variação do teor de cimento e a espessura das betonilhas têm pouca influência na variação de ΔL_w . É provável que a rigidez da lajeta flutuante seja determinante para os reduzidos valores de ΔL_w verificados. No entanto, quando as betonilhas

com ECG são substituídas por uma mistura solta de grânulos de cortiça, ECG(3/5+5/10), o desempenho dos sistemas de pavimento melhora substancialmente.

O modelo analítico usado para a previsão da redução da transmissão de sons de impacto revelou boas aproximações entre as respostas simuladas e os resultados experimentais, como referido na secção 5.3. Considera-se que o referido modelo pode ser usado na previsão do isolamento sonoro a sons de percussão dos sistemas de pavimento que integram as betonilhas desenvolvidas na presente dissertação.

Com o trabalho realizado é possível afirmar que as betonilhas com ECG estudadas podem ser aplicadas, com vantagem, em camadas de enchimento, em alternativa às betonilhas de areia convencionalmente usadas, pois permitem reduzir a transmissão de sons de impacto dos sistemas de pavimento. Estas betonilhas por integrarem resíduos da indústria corticeira, abundantes em Portugal, contribuem significativamente para reduzir o impacto ambiental da solução construtiva.

5.5 ANEXO

DESCRIÇÃO DO MODELO ANALÍTICO

O modelo analítico para a avaliação da transmissão de sons de impacto através de um sistema de pavimento multicamada é constituído por diferentes camadas elásticas limitadas entre duas camadas fluidas que representam o ar circundante (Figura 5.14). O modelo possibilita a determinação do campo de ondas gerado pela perturbação de um meio estratificado, por acção de uma carga pontual 3D.

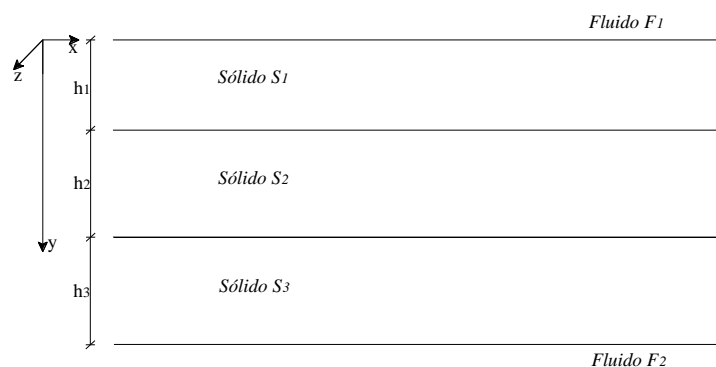


Figura 5. 14 — Geometria do problema.

As camadas elásticas e acústicas apresentam dimensões infinitas segundo as direcções x e z e o campo incidente é gerado por cargas verticais pontuais 3D. As ondas elásticas incidentes,

provocadas pela acção de cargas de impacto, propagam-se através dos diversos estratos sofrendo sucessivos fenómenos de refacção e de reflexão, originando, desta forma, ondas elásticas ao longo do seu percurso. Uma parte destas ondas atingirá as superfícies limítrofes do sistema, conduzindo à criação de ondas de pressão nas camadas fluidas. A solução para este fenómeno complexo pode ser determinada considerando a contribuição de um conjunto de termos de superfície, definidos para cada superfície de transição entre os diversos meios. Os referidos termos são, neste modelo analítico, expressos através do somatório de potenciais dilatacionais, φ , e distorcionais, ψ , no caso das camadas sólidas (Figura 5.15 a)) e de um potencial dilatacional, φ , no caso das camadas fluidas (Figura 5.15 b)).

O campo de ondas incidentes também pode ser expresso como o resultado de potenciais dilatacionais e distorcionais. Os potenciais são definidos por integrais de Bessel ao longo da direcção vertical, com a aplicação da transformada de Sommerfeld [58]. A obtenção destes integrais pressupõe a existência de fontes virtuais igualmente espaçadas, L_y , ao longo da direcção vertical, resultando assim num somatório de funções de Bessel, com diferentes números de onda, k_y , que determinam o campo de ondas 3D. Os potenciais, ou também designados termos de superfície, traduzem as reflexões, devidas à acção de uma carga em meio elástico a actuar segundo a direcção y , nas várias fronteiras, do sistema multicamada.

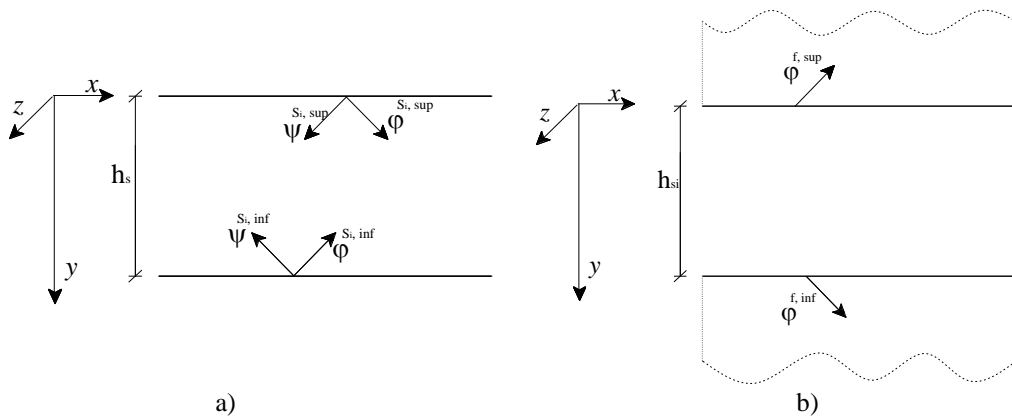


Figura 5. 15 – Definição dos potenciais devidos à acção de uma carga vertical 3D: a) Meio sólido; b) Interfaces fluidas.

Considerando a existência de fontes virtuais igualmente espaçadas L_y , segundo a direcção vertical (direcção y), o campo de ondas gerado por uma fonte pontual harmónica vertical, posicionada em (x_0, y_0, z_0) , no topo da camada sólida superior é dada através dos seguintes potenciais:

$$\varphi_{inc}(x, y, z, \omega) = \frac{-\pi}{\rho^{S_1} \omega^2 L_y} \sum_{n=1}^N J_0(k_n r) k_n \frac{E_b^{S_1}}{v_n^{S_1}} \text{sign}(y - y_0) \quad (5.10)$$

$$\psi_{inc}(x, y, z, \omega) = \frac{\pi}{\rho^{S_1} \omega^2 L_y} \sum_{n=1}^N J_0(k_n r) k_n \frac{E_c^{S_1}}{-i v_n^{S_1}} \quad (5.11)$$

em que ρ^{S_i} corresponde à massa volúmica da camada sólida i , $J_0(\)$ são funções de Bessel de ordem 0, $E_b^{S_1} = e^{-i v_n^{S_1} |y - y_0|}$, $E_c^{S_1} = e^{-i v_n^{S_1} |y - y_0|}$, $v_n^{S_i} = \sqrt{(k_p^{S_i})^2 - k_n^2}$ ($\text{Im}(v_n^{S_i}) \leq 0$), $\gamma_n^{S_i} = \sqrt{(k_s^{S_i})^2 - k_n^2}$ ($\text{Im}(\gamma_n^{S_i}) \leq 0$), $k_p^{S_i} = \omega / \alpha^{S_i}$, $k_s^{S_i} = \omega / \beta^{S_i}$, $k_n = \frac{2\pi}{L_y} n$ é o número de onda na direcção y e $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2}$; α^{S_i} e β^{S_i} são as velocidades das ondas longitudinais e transversais no meio sólido i . A distância L_y é determinada de forma a evitar contaminação espaciais das fontes virtuais, *i.e.*, não pode ser demasiado reduzida para que não haja sobreposição do efeito das fontes [59].

Todas as interfaces sólido-fluído e sólido-sólido geram termos de superfície que podem ser expressos de forma similar à dos termos de superfície usando potenciais com amplitudes conhecidas. A amplitude destes potenciais é definida de forma a satisfazer a continuidade dos deslocamentos e das tensões normais, *i.e.*, tensões tangenciais nulas nas interfaces fluído-sólido e continuidade de tensões e de deslocamentos nas interfaces sólido-sólido.

A partir de um conjunto de sub-matrizes associadas a cada estrato e impondo as correspondentes condições de fronteira é possível sintetizar o sistema global de equações que definem o comportamento do pavimento:

Camada Sólida

Para a camada elástica i , os potenciais de deslocamento na fronteira superior (sup) e na fronteira inferior (inf) podem ser escritas na seguinte forma:

$$\begin{array}{l} \text{Fronteira superior} \\ \varphi^{S_i, \text{sup}} = E_a^{S_i} \sum_{n=1}^{n=+N} [-J_0(k_n r) k_n E_{b0}^{S_i} \text{sign}(y - y^{i, \text{sup}}) A_n^{1, S_i}] \\ \psi^{S_i, \text{sup}} = E_a^{S_i} \sum_{n=1}^{n=+N} \left[-J_0(k_n r) k_n \frac{E_{c0}^{S_i}}{-i \gamma_n^{S_i}} A_n^{2, S_i} \right] \\ \text{Fronteira inferior} \\ \varphi^{S_i, \text{inf}} = E_a^{S_i} \sum_{n=1}^{n=+N} [-J_0(k_n r) k_n E_{b1}^{S_i} \text{sign}(y - y^{i, \text{inf}}) A_n^{3, S_i}] \\ \psi^{S_i, \text{inf}} = E_a^{S_i} \sum_{n=1}^{n=+N} \left[J_0(k_n r) k_n \frac{E_{c1}^{S_i}}{-i \gamma_n^{S_i}} A_n^{4, S_i} \right] \end{array} \quad (5.12)$$

sendo $E_a^{S_i} = \frac{\pi}{\rho^{S_i} \omega^2 L_y}$, $E_{c0}^{S_i} = e^{-i \gamma_n^{S_i} |y - y^{i, \text{sup}}|}$, $E_{c1}^{S_i} = e^{-i \gamma_n^{S_i} |y - y^{i, \text{inf}}|}$, $y^{i, \text{sup}}$ e $y^{i, \text{inf}}$ as coordenadas das fronteiras superior e inferior da camada i , respectivamente, $E_{b0}^{S_i} = e^{-i v_n^{S_i} |y - y^{i, \text{sup}}|}$, $E_{b1}^{S_i} =$

$e^{-iv_n^{S_i}|y-y^{i,inf}|}$, A_n^{k,S_i} ($k = 1,4$) são as amplitudes dos potenciais de deslocamento no sólido. Para cada valor de k_n , podem-se determinar as tensões ($\sigma_{yy} = \lambda \nabla^2 \varphi + 2\mu \left[\frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 y} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nabla^2 \psi - \frac{\partial^2 \psi}{\partial^2 y} \right) \right]$) e $\sigma_{yr} = \mu \left[2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r \partial y} + \left(2 \frac{\partial^3 \psi}{\partial r \partial^2 y} - \frac{\partial}{\partial r} \nabla^2 \psi \right) \right]$ e os deslocamentos ($u_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \right]$) e $u_r = \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial y}$) nas fronteiras da camada sólida.

Fronteiras superior e inferior das camadas fluidas

Considerando que a camada fluida superior tem uma constante de Lamé, λ^{fsup} , que permite que a velocidade das ondas longitudinais seja α^{fsup} , e que a constante de Lamé da camada fluida inferior, λ^{finf} , possibilita que a velocidade das ondas longitudinais seja α^{finf} , os potenciais diltacionais assumem a seguinte forma:

$$\begin{array}{l} \text{Fluído superior} \\ \text{Fluído inferior} \end{array} \quad \varphi^{f_{sup/inf}} = \frac{-2\pi}{L_y} \sum_{n=1}^{n=+N} \left[J_0(k_n r) k_n \frac{-(\alpha^{f_{top/inf}}) E_f^{f_{top/inf}}}{\omega^2 \lambda^{f_{top/inf}} v_{nf}^{f_{top/inf}}} A_n^{f_{top/inf}} \right] \quad (5.13)$$

com $E_f^{fsup} = e^{-iv_{nf}^{fsup}|y|}$, $E_f^{finf} = e^{-iv_{nf}^{finf}|y-h|}$, $v_{nf}^{fsup} = \sqrt{k_{fsup}^2 - k_n^2}$, $v_{nf}^{finf} = \sqrt{k_{finf}^2 - k_n^2}$ em que $Im(v_{nf}^{fsup}) \leq 0$, $Im(v_{nf}^{finf}) \leq 0$, $k_{fsup} = \omega/\alpha^{fsup}$, $k_{finf} = \omega/\alpha^{finf}$, e h corresponde à altura total do sistema de pavimento. A_n^{fsup} e A_n^{finf} são as amplitudes dos potenciais dilatacionais associados ao meio fluido circundante. Desta forma, é possível determinar as pressões ($\sigma = \lambda \nabla^2 \varphi$) e os deslocamentos normais ($u_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}$) nas fronteiras, para cada valor de k_n .

Sistema linear de equações

As amplitudes dos potenciais são definidas em função das condições de fronteira impostas, obtendo-se um sistema de m equações com $m = 2 + 4n_s$ (n_s é o número de estratos sólidos do sistema de pavimento) que se apresenta na seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & B_{11}(s_i = s_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{21}(s_i = s_1) & A_{11}(s_i = s_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{21}(s_i = s_2) & A_{11}(s_i = s_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{21}(s_i = s_3) & C_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_n^{fsup} \\ A_n^i(s_i = s_1) \\ A_n^i(s_i = s_2) \\ A_n^i(s_i = s_3) \\ A_n^{finf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.14).$$

em que

$$C_{11} = \frac{-2\pi}{L_y} \begin{bmatrix} 0 \\ i \\ \frac{f_{sup}}{v_{nf}} \\ \frac{(\alpha^{f_{sup}})^2}{\omega^2 \lambda^{f_{sup}}} \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

$$B_{11} = \frac{\pi}{\rho^{s_i} \omega^2 L_y} \begin{bmatrix} -2i\mu^{s_i} v_n^{s_i} & \mu^{s_i} i \left(-\frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_i}} + \frac{(k_s^{s_i})^2}{2} \right) & -2i\mu^{s_i} v_n^{s_i} E_{bh}^{s_i} & \mu^{s_i} i \left(-\frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_i}} + \gamma_n^{s_i} \right) E_{ch}^{s_i} \\ -2\mu^{s_i} \left(-k_n^2 + \frac{(k_s^{s_i})^2}{2} \right) & -2\mu^{s_i} k_n^2 & 2\mu^{s_i} \left(-k_n^2 + \frac{(k_s^{s_i})^2}{2} \right) E_{bh}^{s_i} & 2\mu^{s_i} k_n^2 E_{ch}^{s_i} \\ -iv_n^{s_i} & -i \frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_i}} & -iv_n^{s_i} E_{bh}^{s_i} & -i \frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_i}} E_{ch}^{s_i} \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} -2i\mu^{s_i} v_n^{s_i} & \mu^{s_i} i \left(-\frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_i}} + \gamma_n^{s_i} \right) & -2i\mu^{s_i} v_n^{s_i} E_{bh}^{s_i} & \mu^{s_i} i \left(-\frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_i}} + \gamma_n^{s_i} \right) E_{ch}^{s_i} \\ -2\mu^{s_i} \left(-k_n^2 + \frac{(k_s^{s_i})^2}{2} \right) & -2\mu^{s_i} k_n^2 & 2\mu^{s_i} \left(-k_n^2 + \frac{(k_s^{s_i})^2}{2} \right) E_{bh}^{s_i} & 2\mu^{s_i} k_n^2 E_{ch}^{s_i} \\ 1 & -1 & E_{ch}^{s_i} & E_{ch}^{s_i} \\ -iv_n^{s_i} & -i \frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_i}} & -E_{bh}^{s_i} & -i \frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_i}} E_{ch}^{s_i} \\ -iv_n^{s_i} E_{bh}^{s_i} & -iv_n^{s_i} E_{bh}^{s_i} & -iv_n^{s_i} E_{bh}^{s_i} & -iv_n^{s_i} E_{bh}^{s_i} \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

$$A_{21} = \frac{\pi}{\rho^{s_i} \omega^2 L_y} \begin{bmatrix} -2i\mu^{s_i} v_n^{s_i} E_{bh}^{s_i} & \mu^{s_i} i \left(-\frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_i}} + \gamma_n^{s_i} \right) E_{ch}^{s_i} & -2i\mu^{s_i} v_n^{s_i} & \mu^{s_i} i \left(-\frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_i}} + \gamma_n^{s_i} \right) \\ -2\mu^{s_i} \left(-k_n^2 + \frac{(k_s^{s_i})^2}{2} \right) E_{bh}^{s_i} & -2\mu^{s_i} k_n^2 E_{ch}^{s_i} & 2\mu^{s_i} \left(-k_n^2 + \frac{(k_s^{s_i})^2}{2} \right) & 2\mu^{s_i} k_n^2 \\ E_{bh}^{s_i} & -E_{ch}^{s_i} & -1 & E_{ch}^{s_i} \\ -iv_n^{s_i} E_{bh}^{s_i} & -i \frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_i}} E_{ch}^{s_i} & -iv_n^{s_i} & -i \frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_i}} \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

$$B_{21} = \frac{\pi}{\rho^{s_i} \omega^2 L_y} \begin{bmatrix} -2i\mu^{s_i} v_n^{s_i} E_{bh}^{s_i} & \mu^{s_i} i \left(-\frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_i}} + \frac{(k_s^{s_i})^2}{2} \right) E_{ch}^{s_i} & -2i\mu^{s_i} v_n^{s_i} & \mu^{s_i} i \left(-\frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_i}} + \gamma_n^{s_i} \right) \\ -2\mu^{s_i} \left(-k_n^2 + \frac{(k_s^{s_i})^2}{2} \right) E_{bh}^{s_i} & -2\mu^{s_i} k_n^2 E_{ch}^{s_i} & 2\mu^{s_i} \left(-k_n^2 + \frac{(k_s^{s_i})^2}{2} \right) & 2\mu^{s_i} k_n^2 \\ -iv_n^{s_i} E_{bh}^{s_i} & -i\frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_i}} E_{ch}^{s_i} & -iv_n^{s_i} & -i\frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_i}} \end{bmatrix} \quad (5.19).$$

Nestas sub-matrizes, $E_{ch}^{s_i} = e^{-i\gamma_n^{s_i} h_i}$ e $E_{bh}^{s_i} = e^{-i\gamma_n^{s_i} h_i}$ e h_i corresponde à espessura da camada sólida.

$$C_{21} = \frac{-2\pi}{L_y} \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{i}{v_{nf}^{f_{inf}}} \\ -\frac{(\alpha^{f_{inf}})^2}{\omega^2 \lambda^{f_{inf}}} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

$$A_n^i = \begin{bmatrix} A_n^{1,s_i} \\ A_n^{2,s_i} \\ A_n^{3,s_i} \\ A_n^{4,s_i} \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

$$F_1 = \frac{\pi}{\rho^{s_i} \omega^2 L_y} \begin{bmatrix} 2i\mu^{s_1} v_n^{s_1} e^{-iv_n^{s_1} y_0} - \mu^{s_i} i \left(-\frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_1}} + \gamma_n^{s_1} \right) e^{-i\gamma_n^{s_1} y_0} \\ 2\mu^{s_1} \left(-k_n^2 + \frac{(k_s^{s_1})^2}{2} \right) e^{-iv_n^{s_1} y_0} + 2\mu^{s_1} k_n^2 e^{-iv_n^{s_1} y_0} \\ iv_n^{s_1} e^{-iv_n^{s_1} y_0} + i\frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_1}} e^{-i\gamma_n^{s_1} y_0} \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

$$F_2 = \frac{\pi}{\rho^{s_i} \omega^2 L_y} \begin{bmatrix} 2i\mu^{s_1} v_n^{s_1} e^{-iv_n^{s_1} |h-y_0|} - \mu^{s_i} i \left(-\frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_1}} + \gamma_n^{s_1} \right) e^{-i\gamma_n^{s_1} |h-y_0|} \\ 2\mu^{s_1} \left(-k_n^2 + \frac{(k_s^{s_1})^2}{2} \right) e^{-iv_n^{s_1} |h-y_0|} + 2\mu^{s_1} k_n^2 e^{-i\gamma_n^{s_1} |h-y_0|} \\ -e^{-iv_n^{s_1} |h-y_0|} + e^{-i\gamma_n^{s_1} |h-y_0|} \\ iv_n^{s_1} e^{-iv_n^{s_1} |h-y_0|} + i\frac{k_n^2}{\gamma_n^{s_1}} e^{-i\gamma_n^{s_1} |h-y_0|} \end{bmatrix} \quad (5.23).$$

Depois de determinados os potenciais das amplitudes, é possível determinar as pressões nos fluidos que circundam o sistema de pavimento, através da seguinte formulação:

No cimo das camadas de pavimento:

$$p(x,y,z,\omega) = \frac{-2\pi}{L_y} \sum_{n=1}^{n=+N} \left[J_0(k_n r) k_n \frac{E_f^{f_{top}}}{v_{nf}^{f_{top}}} A_n^{f_{top}} \right] \quad (5.24).$$

No fundo das camadas de pavimento:

$$p(x,y,z,\omega) = \frac{-2\pi}{L_y} \sum_{n=1}^{n=+N} \left[J_0(k_n r) k_n \frac{E_f^{f_{inf}}}{v_{nf}^{f_{inf}}} A_n^{f_{inf}} \right] \quad (5.25).$$

5.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Rasmussen, Birgit. 2010. Sound insulation between dwellings - Requirements in building regulations in Europe. *Applied Acoustics*. Vol. 71, pp. 373-385.
- [2] Rasmussen, Birgit; Rindel, Jens Holger. 2010. Sound insulation between dwellings - descriptors applied in building regulations in Europe. *Applied Acoustics*. Vol.71, pp. 171-180.
- [3] Blauert, J.; Xiang, N. 2008. *Acoustics for Engineers*. Try Lectures Springer. ISBN 978-3-540-76346-8.
- [4] Shiavi, Alessandro; Pavoni, Belli Andrea; Russo, Francesco. 2005. Estimation of acoustical performance of floating floors from dynamic stiffness of resilient layers. *Building Acoustics*. Vol. 12(2), pp. 99-113.
- [5] Kim, K.; Jeong, G.; Yang, K.; Sohn, J. 2009. Correlation between dynamic stiffness of resilient materials and heavyweight impact sound reduction level. *Building and Environment*. Vol.44, pp. 1589-1600.
- [6] Neithalath, N.; Weiss, J.; Olek, J. 2004. Acoustic performance and damping behavior of cellulose-cement- composites. *Cement and Concrete Composistes*. Vol. 26 (4), pp.359-370
- [7] Rushforth, I. M.; Horoshenkov, K. V.; Mirafatab, M.; Swift, M. J. 2005. Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled carpet waste. *Applied Acoustics*. Vol. 66, pp. 731-749.

- [8] Fernandes, E. M.; Correló, V. M.; Chagas, A. M.; Mano, J. F.; Reis, R. L. 2011. Properties of new cork-polymer composites: Advantages and drawbacks as compared with commercially available fiberboard materials. *Comp. Struct.* 93 (12), pp. 3120-3129.
- [9] Olmeda, J.; Frías, M.; Olaya, M.; Frutos, B.; Sánchez, M. I. R. 2012. Recycling petroleum coke in blended cement mortar to produce lightweight material for Impact Noise Reduction. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 34 (10), pp. 1194-1201.
- [10] Rodrigues, R. C.; Carvalho, A. P. O. 2003. Natural vegetal fibbers as a new resilient layer for floating floors. *Euronoise 2003 - 5th European Conference on Noise Control*. Naples, Italy. 19-21 May.
- [11] Benkreira, H.; Khan, A.; Horoshenkov, K. V. 2011. Sustainable acoustic and thermal insulation materials from elastomeric waste residues. *Chem. Eng. Science*. Vol. 66 (18), pp. 4157-4171.
- [12] Faustino, J.; Pereira, L.; Soares, S.; Cruz, D.; Paiva, A.; Varum, H.; Ferreira, Pinto, J. 2012. Impact sound insulation techniques using corn com particleboard. *Const. Build. Mat.* Vol. 37, pp. 153-159.
- [13] Patrício, Jorge. 2007. *Acústica nos Edifícios*. Verlag Dashofer.
- [14] Hongisto, V. 2001. A case study of flanking transmission through double structures. *Applied Acoustics*. Vol.62, pp. 589-599.
- [15] Metzen, Heinrich A.; Schumacher, Rolf. 2005. Prediction of sound insulation in timber frame buildings. *Forum Acusticum*. Budapest, Hungary, pp. 2347-2352.
- [16] Quirt, J. D.; Nightingale, T. R. T. 2007. On a semi-empirical approach to predicting sound insulation in lightweight framed construction. *Internoise 2007*. Istanbul, Turkey. August 28-31, pp. 1-9.
- [17] Zeitler, B.; Nightingale, T. R. T.; S., Schoenwald. 2010. Cremer's parallel plates applied in lightweight construction. *Internoise 2010*. Lisbon, Portugal. 13-16 June.
- [18] Stewart, M. A.; Mackenzie, R. K. 2000. A comparison of the predicted dynamic stiffness of resilient layers with calculated values obtained from the measured response. *Building Acoustics*. Vol. 7(4), pp. 297-313.
- [19] Hopkins, C.; Wilson, R.; Craik, R. J. M. 1999. Dynamic stiffness as an acoustic specification parameter of wall ties used in masonry cavity walls. *Applied Acoustics*. Vol 58, pp. 51-68.
- [20] Banerjee, J. R.; Cheung, C. W.; Morishima, R.; Perera, M.; Njuguna, J. 2007. Free vibration of a three-layered sandwich beam using the dynamic stiffness method and experiment. *Journal of solids and Structures*. Vol. 44, pp. 7543-7563.

- [21] António, J., Tadeu, A.; Nossa, A. 2008. Modelação da rigidez dinâmica de materiais resilientes versus resultados experimentais. *Acústica 2008*. Coimbra, Portugal. 18-22 Outubro.
- [22] Park, H.; Kim, Y.; Song, G.; Kim, S. 2010. Verification of standard floor impact source by comparing with living impact source. *Internoise 2010*. Lisbon, Portugal. 13-16 June.
- [23] Su, S.; Smith, S.; Fairfield, C. 2011. An experimental study of the effects of resilient bars on plate vibration. *Applied Acoustics*. Vol. 72, pp. 241-247.
- [24] Neves, A., António, J.; Nossa, A. 2008. Resultados experimentais da rigidez dinâmica de materiais usados sob pavimentos flutuantes. *Acústica 2008*. Coimbra, Portugal. 18-22 Outubro.
- [25] Norma, ISO 9052-1:1989. 1989. *Acoustics - Determination of dynamic stiffness - Part 1: Materials used under floating floors in dwellings*.
- [26] Asdrubali, F.; D'Alessandr, A.; Shiavoni, S.; Baldinelli, G. 2011. Lightweight screeds made of concrete and recycled polymers; acoustic, thermal, mechanical and chemical characterization. *Forum Acusticum 2011*. Aalborg, Denmark. pp. 821-826.
- [27] Stewart, M. A.; Craik, R. J. M. 2000. Impact sound transmission through a floating floor on a concrete slab. *Applied Acoustics*. Vol. 59, pp. 353-372.
- [28] Craik, R. J. M.; Wilson, R. 1997. Sound transmission through parallel plates coupled along a line. *Applied Acoustics*. Vol. 49, pp. 353-372.
- [29] Nightingale, Trevor R. T.; Bosmans, Ivan. 2007. Two modelling approaches for periodic rib-stiffened plates typical of floor assemblies. *14th International Congress on Sound and Vibration*. Cairns, Australia. 9-12 July. pp. 1-8.
- [30] Zeitler, B.; Schoenwald, S.; Nightingale, T. R. T. 2010. Parametric study of sound transmission through lightweight floors. *Internoise 2010*. Lisbon, Portugal. 13-16 June.
- [31] Legault, Julien; Noureddine, Atalla. 2010. Sound transmission through a double panel structure periodically coupled with vibration insulators. *Journal of Sound and Vibration*. Vol 329, pp. 3082-3100.
- [32] Tadeu, A.; Pereira, A.; Godinho, L.; Antonio, J. 2007. Prediction of airborne sound and impact sound insulation provided by single and multilayer systems using analytical expressions. *Applied Acoustics*. Vol. 68. pp. 17-42.
- [33] Sousa, A. Neves; Gibbs, B. M. 2011. Low frequency impact sound transmission in dwellings through homogeneous concrete floors and floating floors. *Applied Acoustics*. Vol. 72, pp. 177-189.
- [34] Lamb, H. 1904. On the propagation of tremors at the surface of an elastic solid. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*. 1904, Vol. A203, pp. 1-42.

- [35] Bouchon, M. 1979. Discrete wave number representation of elastic wave fields in space dimensions. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 84, pp. 3609-3614.
- [36] Kim, J.; Papageorgiou, A.S. 1993. Discrete wave-number boundary element method for 3D scattering problems. *Journal of Engineering Mechanics - ASCE*. Vol. 119 (3), pp. 603-624.
- [37] Tadeu, A.; Kausel, E. 2000. Green's functions for two-and-a-half dimensional elastodynamic problems. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*. Vol. 126(10), pp. 1093-1097.
- [38] Tadeu, A.; António, J. 2002. Green's functions for elastodynamic problems in layered acoustic and elastic formations. *Journal of Computer Modelling in Engineering and Sciences*. Vol. 2, pp. 477-495.
- [39] António, J. 2002. *Propagação de ondas em meios acústicos e elásticos: modelos analíticos e numéricos*. Tese de Doutoramento. DEC – FCT - Universidade de Coimbra.
- [40] Godinho, L. 2003. *Propagação de ondas em sistemas que requerem o estudo da interacção sólido-fluido*. Tese de Doutoramento. DEC - FCT - Universidade de Coimbra.
- [41] Pereira, A. 2007. *Análise do isolamento aos sons aéreos e de percussão de elementos de separação - modelos analíticos e numéricos*. Tese de Doutoramento. DEC-FCT Universidade de Coimbra.
- [42] Norma EN ISO 10140-3. 2010. *Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 3: Measurement of impact sound insulation*. CEN/ISO.
- [43] Norma, NP EN ISO 717-2:2009 (Ed. 1). 1996 e 2006. *Acústica. Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção. Parte 2: Isolamento sonoro a sons de percussão*. IPQ.
- [44] Norma, NP EN ISO 354. 2007. *Medição da absorção sonora em câmara reverberante*. IPQ.
- [45] Cremer, L., Heckl, M.; Ugar, E. E. 1988. *Structure-Borne Sound - Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies*. Springer-Verlag, 2nd edition.
- [46] Norma, ISO 7626-5:1994. *Vibration and shock - Experimental determination of mechanical mobility. Part 5: Measurements using impact excitation with an exciter which is not attached to the structure*. ISO.
- [47] Fahy F. 2001. *Foundations of Engineering Acoustics*, New York, Academic Press.
- [48] Delanoy, J.; Recuero, M. 2007. Loss factor measurements on plasterboard. *19th International Congress on Acoustics*. Madrid, Spain. 2-7 September.
- [49] Ford, R. D.; Hothersall, D. C. 1974. The impact insulation assessment of covered concrete floors. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 33 (1), pp. 103-115.
- [50] Hall, R. 1999. *Impact Sound Insulation of Flooring Systems Polyurethane Foam on Concrete Floors - Doctoral Thesis*. Sheffield Hallam University.

- [51] Jeon, J. Y.; Sato, S. 2008. Annoyance caused by heavyweight floor impact sounds in relation to the autocorrelation function and sound quality metrics. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 311, pp. 767-785.
- [52] Johansson, Carin. 1995. Low-Frequency Impact Sound Insulation of a Light Weight Wooden Joist Floor. *Applied Acoustics*. Vol. 44, pp. 133-147.
- [53] Josse, R. 1977. *Notions d'Acoustique - A l'usage des architectes ingénieurs urbanistes*. 3^{ème} édition.
- [54] Meier, A.; Schmitz, A. 1999. Application of total loss factor measurements for the determination of sound insulation. *Building Acoustics*. Vol. 6 (2), pp. 71-84.
- [55] Moreira, Anabela, António, Julieta; Tadeu, António. 2010. Impact sound reduction of concrete layers containing cork granules. *Internoise 2010*. Lisbon, Portugal. 13-16 June.
- [56] Patrício, J.; Jacinto, M.; Piedade, A. C. 1997. Comportamento acústico de revestimentos de piso: estudo analítico e experimental. *XXVIII Tecniacústica*. Oviedo, Espanha.
- [57] Vigran, Tor Erik. 2008. *Building Acoustics*. Taylor & Francis.
- [58] Ewing, W. M.; Jardetzky, W. S. Press, F. 1957. *Elastic waves in layered media*. McGraw-Hill, New York.
- [59] Bouchon M, Aki K. 1977. Discrete wave-number representation of seismic-source wave field. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 67, pp. 259-277.

Capítulo 6

Comportamento Térmico em Regime
Variável e Permanente de Soluções
Construtivas de Pavimentos Integrando as
Betoneiras Seleccionadas

ÍNDICE

- 6.1 Introdução
- 6.2 Soluções Analíticas
- 6.3 Procedimentos Experimentais
 - 6.3.1 Massa Volúmica e Condutibilidade Térmica
 - 6.3.2 Calor Específico
- 6.4 Atraso Térmico e Transmissão de Calor de Sistemas de Pavimentos
- 6.5 Síntese do Capítulo
- 6.6 Referências Bibliográficas

6.1 INTRODUÇÃO

O desempenho térmico de um edifício depende de diversos factores, designadamente das condições climáticas, das características da construção, das propriedades térmicas dos materiais empregues, do tipo de ocupação e das actividades que se desenvolvem no seu interior.

As características da envolvente do edifício e a natureza dos materiais que a constituem determinam a transmissão térmica entre os ambientes interior e exterior, bem como a inércia térmica do sistema construtivo. Nos últimos anos, tem aumentado a importância atribuída ao contributo da inércia térmica na melhoria das condições de conforto dos edifícios e na redução dos consumos energéticos associados às actividades que se desenvolvem no seu interior [1-6]. No mesmo contexto, a determinação do atraso térmico revela-se de grande importância no que se refere à previsão do comportamento térmico dinâmico de um edifício e consequentemente na determinação da sua inércia térmica.

Antonopoulos e Tzivaniadis [7] definiram o atraso térmico como o tempo necessário para que a temperatura média do ar interior, elementos de compartimentação e recheio, aumente para um valor acima do valor médio das variações de temperatura do exterior. O trabalho citado define um conjunto de equações diferenciais que descrevem a transferência de calor e o balanço energético em edifícios e que permitem determinar o atraso térmico para diferentes condições climáticas e para uma diversidade de edifícios, isolados e não isolados. Alguns anos depois, Antonopoulos e Koronaki [8] estimaram o atraso térmico de alguns edifícios em função da massa interior, *i.e.*, da influência dos elementos de compartimentação e do recheio. Com este estudo, os autores demonstraram que a massa interior promove, em mais de 40%, o aumento do atraso térmico. Num estudo distinto [2], os mesmos autores relacionaram outros parâmetros, nomeadamente a capacidade térmica efectiva e o atraso térmico, com as espessuras das camadas da envolvente e a percentagem dos seus elementos constituintes. Os mesmos autores concluíram que o conhecimento da contribuição de cada componente da envolvente no desempenho térmico dinâmico é importante para melhorar o estudo na fase de projecto. Kravvaritis *et al.* [9] desenvolveram um procedimento que permite quantificar as propriedades térmicas de PCM¹, tais como o calor de alteração de fase, a temperatura e as correspondentes capacidades de calor. Simões *et al.* [10] apresentaram, por seu turno, uma formulação analítica que permite determinar o atraso térmico em sistemas constituídos por várias camadas e que incorporam materiais de isolamento, tais como cortiça, lã mineral e poliestireno expandido. Neste trabalho, foram avaliadas soluções construtivas de paredes, variando o tipo de isolamento térmico, a sua espessura e a localização relativa na solução. Os resultados obtidos permitem afirmar que a

¹ *Phase Change Materials* que correspondem a materiais cuja mudança de estado físico ocorre a temperaturas próximas das temperaturas de conforto.

contribuição dos materiais de isolamento térmico no atraso térmico é mais relevante em sistemas constituídos por um número reduzido de camadas. O mesmo estudo demonstra, ainda, que os maiores atrasos térmicos correspondem a soluções construtivas constituídas por camadas com baixa difusividade térmica e elevada espessura.

Quando se pretende otimizar requisitos térmicos e acústicos num edifício, a adopção de envolventes constituídas por sistemas multi-camada, com materiais de diferentes características, afigura-se uma solução racional [6], [11-15]. Para além destes requisitos técnicos, e perante as actuais conjunturas económica e ambiental, torna-se necessário que os materiais aplicados tenham reduzido impacto ambiental [16], [17]. Nesta perspectiva, a integração de granulados de cortiça em betões e betonilhas permite, não só aligeirar o peso próprio de elementos estruturais e de camadas de forma, como também melhorar os desempenhos térmico e acústico, bem como dar um destino útil aos resíduos provenientes da indústria corticeira, conforme explanado no Capítulo 2. A conjugação destas medidas permite economizar recursos materiais e energéticos, contribuindo, assim, para uma indústria de construção ambientalmente sustentável. Os últimos anos têm sido profícuos em trabalhos de investigação sobre as potencialidades de algumas matérias-primas autóctones e resíduos industriais em termos da sua aplicação como materiais de construção [18-25].

No presente capítulo, alarga-se o estudo da caracterização das betonilhas com agregados de cortiça ao atraso térmico quando estas fazem parte de sistemas estratificados de pavimentos de betão. Assim, procede-se à comparação dos atrasos térmicos de sistemas de pavimentos que integram betonilhas com agregados de cortiça expandida, ECG, (M150, M250 e M400) e betonilhas de referência (R150, R250 e R400) sobre uma laje estrutural de betão armado. Dado tratarem-se de materiais heterogéneos, cuja caracterização térmica é dificultada pela grande variabilidade das amostras, o estudo apresentado socorre-se do modelo analítico, para a determinação do calor específico, com recurso a medições experimentais. O atraso térmico é calculado utilizando o modelo analítico, sendo necessário conhecer a massa volúmica e o coeficiente de condutibilidade térmica das betonilhas. Para tal, utilizam-se os resultados experimentais de massa volúmica aos 28 dias, apresentados no Capítulo 2, e de condutibilidade térmica, apresentados no Capítulo 3. A concretização das simulações analíticas carece ainda do conhecimento das propriedades térmicas (coeficiente de condutibilidade térmica e calor específico) e da massa volúmica dos restantes materiais que constituem os sistemas de pavimento.

A transferência de calor por condução, através dos sistemas de pavimento, é simulada através de uma formulação analítica que utiliza funções de Green [26], [27]. As soluções analíticas usadas foram previamente validadas por resultados experimentais [10], [28]. Os

sistemas de pavimento estudados são constituídos pela sobreposição de camadas de betão, betonilhas com ECG, betonilhas convencionais (de referência) e aglomerado de cortiça expandida (ICB). Estes sistemas multi-camada são submetidos a uma variação sinusoidal de temperatura numa das faces exteriores. Para a determinação do calor específico das betonilhas, recorreu-se à monitorização das variações de temperaturas nas interfaces de um sistema constituído por duas placas de poliestireno expandido (EPS), intercaladas por um provete da betonilha a caracterizar, quando sujeito a fenómenos de transferência de calor. Para este efeito, utilizou-se um equipamento de pratos quentes (*guarded hot plate apparatus*). As variações de temperatura no topo e na base do sistema multi-camada são posteriormente introduzidas no modelo analítico, assim como a massa volúmica, o coeficiente de condutibilidade térmica de cada betonilha e as propriedades térmicas do EPS. O valor do calor específico é determinado, para cada betonilha, em função do melhor ajuste entre as curvas analíticas e as curvas experimentais que traduzem as variações de temperatura através do sistema multi-camada. Para os restantes materiais, foram aplicados valores de calor específico indicado na bibliografia consultada. As soluções analíticas, *i.e.* as funções de Green para fontes harmónicas lineares de calor colocadas num meio infinito, são determinadas no domínio da frequência. As respostas no domínio do tempo obtêm-se através de transformadas inversas de Fourier. As soluções analíticas finais são determinadas através da imposição da continuidade de temperatura e de fluxo de calor, nas interfaces de cada camada do sistema de pavimento.

6.2 SOLUÇÕES ANALÍTICAS

O modelo analítico usado no presente trabalho para a simulação do atraso térmico de sistemas multi-camada baseia-se em trabalho desenvolvido, para a simulação da transmissão dinâmica de calor, em meios estratificados [10], [26-30].

Considere-se um sistema multi-camada constituído por m estratos planos de extensão infinita, tal como esquematizado na Figura 6.1. Admita-se que o referido sistema é submetido às temperaturas t_{0b} e t_{0t} , nas superfícies externas inferior e superior, respectivamente. As camadas consideradas apresentam extensão infinita segundo as direcções x e z . As propriedades térmicas e a espessura de cada camada podem diferir entre si.

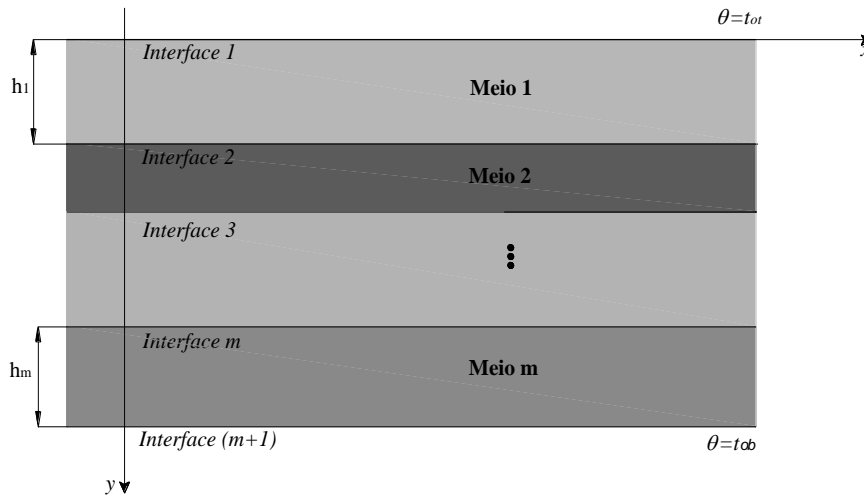


Figura 6.1 – Geometria do problema.

A transferência de calor por condução em cada camada é definida pela seguinte expressão:

$$\lambda_j \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) T(t,y) = \rho_j c_j \frac{\partial T(t,y)}{\partial t} \quad (6.1),$$

em que t corresponde ao tempo, $T(t,y)$ à temperatura, j identifica a camada, λ_j é o coeficiente de condutibilidade térmica, ρ_j é a massa volúmica e c_j é o calor específico do meio j .

A solução é expressa no domínio da frequência, depois de aplicada uma transformada de *Fourier* à equação (6.1):

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} + \left(\sqrt{\frac{-i\omega}{\alpha_j}} \right)^2 \right) \hat{T}(\omega, y) = 0 \quad (6.2),$$

em que $i = \sqrt{-1}$, $K_j = \lambda_j / (\rho_j c_j)$ é a difusividade térmica do estrato j e ω é a frequência.

O campo de calor total é determinado por adição dos termos superficiais de cada camada, de modo a serem verificadas as condições de fronteira, em cada interface, *i.e.* continuidade de temperatura e de fluxos de calor em cada camada.

Para a camada j , os termos de superfície nas interfaces superior e inferior são dadas, respectivamente, por:

$$\hat{T}_{j1}(\omega, y) = E_{oj} \frac{E_{j1}}{\nu_{0j}} A_{0j}^t \quad (6.3)$$

$$\hat{T}_{j2}(\omega, y) = E_{oj} \frac{E_{j2}}{\nu_{0j}} A_{0j}^b \quad (6.4),$$

em que $E_{0j} = \frac{1}{\lambda_j}$, $E_{j1} = e^{-iv_{0j}|y - \sum_{l=1}^{j-1} h_l|}$, $E_{j2} = e^{-iv_{0j}|y - \sum_{l=1}^j h_l|}$, $v_{0j} = \sqrt{\frac{-i\omega}{K_j}}$ e h_l é a espessura da camada l . A_{0j}^t e A_{0j}^b são as incógnitas e correspondem às amplitudes dos potenciais. \hat{t}_{0t} e \hat{t}_{0b} são definidos através da transformada de Fourier de t_{0t} e t_{0b} , no domínio do tempo. Impondo-se as temperaturas \hat{t}_{0t} e \hat{t}_{0b} , nas superfícies externas superior e inferior, respectivamente, e garantindo-se a continuidade de temperaturas e fluxos de calor através de $(m-1)$ interfaces entre os diferentes estratos, obtém-se um sistema de $2m$ equações. Os termos são, então, organizados na seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{e^{-iv_{01}h_1}}{\lambda_1 v_{01}} & \dots & 0 & 0 \\ \frac{e^{-iv_{01}h_1}}{\lambda_1 v_{01}} & -1 & \dots & 0 & 0 \\ e^{-iv_{01}h_1} & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \frac{e^{-iv_{01}h_1}}{\lambda_1 v_{01}} & \frac{1}{\lambda_1 v_{01}} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & -1 & e^{-iv_{0m}h_m} \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\lambda_1 v_{0m}} & \frac{e^{-iv_{0m}h_m}}{\lambda_m v_{0m}} \\ 0 & 0 & \dots & \frac{e^{-iv_{0m}h_m}}{\lambda_m v_{0m}} & \frac{1}{\lambda_m v_{0m}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{01}^t \\ A_{01}^b \\ \dots \\ A_{0m}^t \\ A_{0m}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{t}_{0t} \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ \hat{t}_{0b} \end{bmatrix} \quad (6.5),$$

Da resolução deste sistema de equações obtém-se a amplitude dos termos de superfície em cada interface, conduzindo às seguintes temperaturas e fluxos de calor em cada estrato j :

$$\hat{T}(\omega, y) = E_{0j} \left(\frac{E_{j1}}{v_{0j}} A_{0j}^t + \frac{E_{j2}}{v_{0j}} A_{0j}^b \right) \quad \text{se} \quad \sum_{l=1}^{j-1} h_l < y < \sum_{l=1}^j h_l \quad (6.6).$$

A solução final é obtida no domínio do tempo, recorrendo à transformada inversa de Fourier e usando frequências complexas. As referidas soluções não requerem qualquer discretização no domínio do espaço e do tempo. É importante salientar, ainda, que não é imposta qualquer restrição à evolução da fonte de calor, uma vez que a resposta estática pode ser obtida para a frequência nula, assegurando apenas que as altas frequências não contribuam significativamente para as respostas.

6.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Nesta secção, apresenta-se a descrição do procedimento experimental a que se recorreu para determinar o calor específico das betonilhas fabricadas com ECG, M150, M250 e M400, e das betonilhas de referência, R150, R250 e R400, cujas composições se apresentaram no Capítulo 2 (secção 2.5). Dada a heterogeneidade das betonilhas, torna-se necessário recorrer a um método indirecto para determinar o seu calor específico, que consiste em registar as variações de temperatura devidas a um fluxo de calor unidireccional que atravessa um provete de betonilha colocado entre duas placas de poliestireno expandido (EPS). O equipamento usado para o efeito foi o λ Meter-Meßtechnik EP 500, descrito no Capítulo 3. Para além do referido equipamento de placas quentes (*guarded hot plate*), recorreu-se igualmente a um conjunto de termopares associados a um dispositivo de registo de dados (*data logger*). Nas interfaces das diversas camadas do sistema, foram colocados termopares que, associados ao *data logger*, permitiram registar as variações de temperaturas verificadas durante a emissão do fluxo calor. Estes resultados foram posteriormente comparados com os obtidos através de soluções analíticas, juntamente com dados previamente determinados por via experimental, designadamente as temperaturas superficiais de cada estrato do sistema e os coeficientes de condutibilidade térmica de cada material.

6.3.1 Massa Volúmica e Condutibilidade Térmica

As massas volúmicas e os coeficientes de condutibilidade térmica das betonilhas foram determinados experimentalmente, tal como se descreveu no Capítulo 2 e no Capítulo 3, respectivamente. As massas volúmicas aparentes consideradas correspondem a provetes cúbicos $0.15 \times 0.15 \times 0.15 \text{ m}^3$, de betonilhas com 28 dias de idade. Na Tabela 6.1, apresentam-se os valores das massas volúmicas e os coeficientes de condutibilidade térmica dos materiais usados nos procedimentos experimentais, *i.e.* das betonilhas de EPS, de betão e de ICB. Na mesma tabela, são igualmente indicadas as incertezas associadas aos valores experimentalmente determinados.

Tabela 6.1 – Coeficiente de condutibilidade térmica, λ , e massa volúmica, ρ_0 , dos materiais que integram as soluções construtivas.

Materiais	Condutibilidade térmica, λ	Massa volúmica, ρ_0
	[m.W/(m.°C)]	[kg/m ³]
EPS	41.00 ± 0.75	14.300 ± 0.233
ICB	38.00 ± 0.65	100.000 ± 0.433
M150	195.00 ± 5.20	520.000 ± 4.992
M250	214.00 ± 5.60	740.000 ± 7.104
M400	318.00 ± 7.90	900.000 ± 8.640
R150	677.00 ± 16.20	1580.000 ± 15.168
R250	699.00 ± 16.70	1600.000 ± 15.360
R400	783.00 ± 18.70	1980.000 ± 18.912
Betão	1400.00 ± 33.20	2300.000 ± 22.080

6.3.2 Calor Específico

O calor específico das placas de EPS e de ICB foi avaliado experimentalmente com o recurso ao equipamento *Netzsch*, modelo *DSC200F3* (Figura 6.2).



Figura 6.2 – Equipamento usado para a determinação experimental do calor específico de materiais homogêneos (Netzsch, modelo DSC200F3).

O calor específico das betonilhas foi determinado indirectamente, utilizando um sistema multi-camada, constituído por um estrato de betonilha acomodado entre duas placas de EPS que, dada a planeza das suas superfícies, permite um contacto integral com os sensores localizados nos pratos do equipamento *λ Meter-Meßtechnik EP 500*. Cada um dos sistemas multi-camada é constituído por três estratos com as espessuras e a sequência de materiais indicados na Tabela 6.2. Para eliminar a influência da descontinuidade nas interfaces dos

materiais, os ensaios foram realizados com uma pressão constante, exercida pelos pratos do equipamento sobre o sistema, de 2500 Pa. Os provetes foram previamente condicionados numa câmara climática, *Fotoclima 300EC10* da marca comercial *Aralab*, nas condições de temperatura ($T=23\pm 2^{\circ}\text{C}$) e humidade relativa ($HR=50\pm 5\%$), até se estabelecer o equilíbrio das suas massas.

Tabela 6.2 – Sistemas multi-camada usados para a determinação indirecta do calor específico.

Materiais	Sistema 1			Sistema 2			Sistema 3		
	EPS	M150	EPS	EPS	M250	EPS	EPS	M400	EPS
Espessura, e (mm)	9.67	97.10	9.57	9.67	92.60	9.57	9.67	94.90	9.57

Materiais	Sistema 4			Sistema 5			Sistema 6		
	EPS	R150	EPS	EPS	R250	EPS	EPS	R400	EPS
Espessura, e (mm)	9.67	97.90	9.57	9.58	98.30	9.55	9.58	97.10	9.55

O equipamento, λ *Meter-Meßtechnik EP 500*, foi programado para que se atinja, nos sistemas de ensaio, a temperatura média de 23°C e para que a diferença de temperaturas entre as unidades de aquecimento e de arrefecimento seja igual a 15°C . Durante o ensaio, a temperatura da superfície superior do sistema (*i.e.*, superfície em contacto com a unidade de aquecimento do equipamento) aumenta, enquanto a temperatura da superfície oposta (*i.e.*, em contacto com a unidade de arrefecimento) diminui. De acordo com as especificações deste equipamento, a transferência de calor, através da unidade central de medição com $0.15 \times 0.15 \text{ m}^2$, é unidireccional, devido ao efeito de *hot ring*. As variações de temperatura nas interfaces dos materiais que constituem o sistema são quantificadas com o recurso a termopares do tipo T (em cobre) de 2 mm de espessura. Em cada interface do sistema, foram colocados dois termopares (Figura 6.3), assim como nas superfícies superior e inferior que contactam, respectivamente, com as unidades de aquecimento e arrefecimento do equipamento. Os dados são registados por um dispositivo de aquisição, *Yokogawa MW 100 data logger*, em intervalos de 10 s. Os ensaios decorreram em ambiente controlado, em termos de temperatura ($T=23\pm 2^{\circ}\text{C}$) e humidade relativa ($HR=50\pm 5\%$) (Figura 6.3 c)).

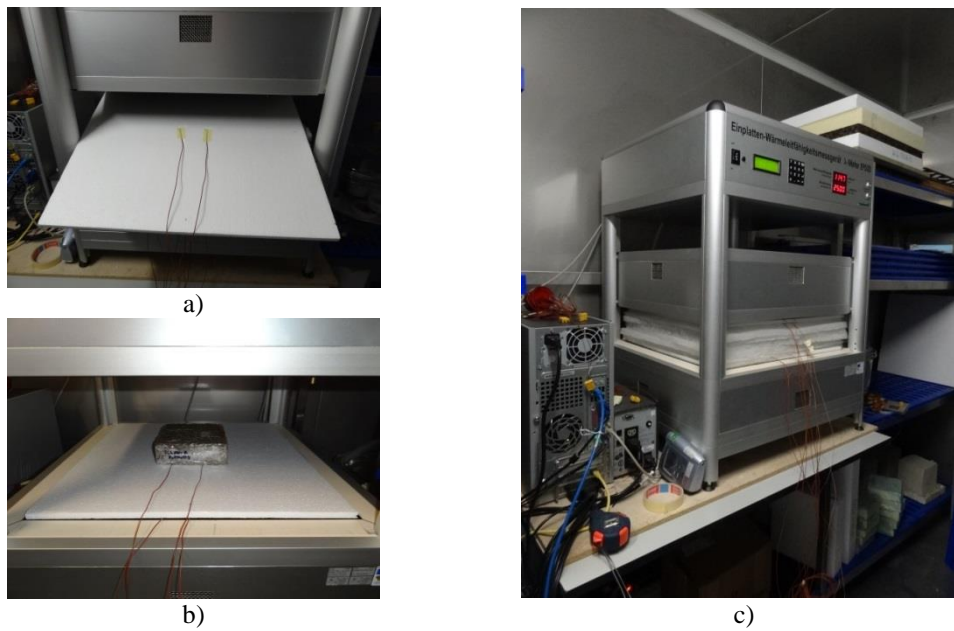


Figura 6.3 – Sistema de ensaio: a) Placa de EPS com os termopares; b) Placa de EPS e provete de betonilha com os termopares; c) Ensaio no interior da câmara climática.

Os resultados assim obtidos serão posteriormente comparados com os resultados das soluções analíticas descritas na secção 6.2. As propriedades térmicas determinadas experimentalmente e apresentadas na Tabela 6.1, permitem concretizar estas simulações com base em soluções analíticas. O calor específico das betonilhas leves e das betonilhas de referência resulta do ajuste das curvas obtidas por via analítica às curvas experimentais, através de um processo iterativo de atribuição do calor específico das betonilhas na simulação.

As temperaturas \hat{t}_{0t} e \hat{t}_{0b} foram inicialmente definidas através da aplicação directa de uma transformada rápida de Fourier, no domínio do tempo, às temperaturas registadas com os termopares nas superfícies exteriores do sistema, subtraindo-lhe a temperatura inicial, T_{inicial} . Reportando as respostas à análise experimental, considerou-se um período de análise de 40 h, tempo suficiente para assegurar o equilíbrio energético, devido à emissão do fluxo de calor unidireccional, do sistema multi-camada, com o ambiente envolvente (*i.e.*, as temperaturas nas diferentes interfaces retomam praticamente os valores iniciais do ensaio). Importa ainda referir que o valor da frequência de cálculo mais elevada é previamente estabelecido de modo que o seu contributo, para a resposta global, seja de tal forma reduzido que se possa desprezar.

Os resultados analíticos foram determinados no domínio da frequência, considerando o intervalo de 0 Hz a $4096/(40 \times 3600)$ Hz, com incrementos de $1.0/(40 \times 3600)$ Hz que definem a janela do tempo necessária para a respectiva análise. A variação de temperatura imposta nas superfícies superior e inferior do sistema pode ser aleatória. A resposta correspondente à frequência 0.0 Hz foi igualmente determinada, uma vez que o recurso a frequências complexas permite que esta resposta possa ser avaliada.

A temperatura no domínio do tempo é determinada por aplicação de uma transformada inversa discreta e rápida de Fourier, no domínio da frequência. O fenómeno de *aliasing* é tratado através da introdução de frequências complexas com uma pequena parte imaginária na forma $\omega_c = \omega - i\eta$ (em que $\omega = 0.7\Delta\omega$, sendo $\Delta\omega$ o incremento da frequência). O efeito desta alteração também é tido em conta no domínio do tempo, através da imposição de uma transformada exponencial, $e^{\eta t}$, das correspondentes respostas obtidas. As respostas assim determinadas são adicionadas às temperaturas iniciais (T_{inicial}), resultando nas temperaturas finais.

Monitorizaram-se as variações de temperatura nas interfaces dos sistemas constituídos pelas duas placas de EPS intercaladas por um provete das betonilhas leves (M150, M250 e M400) e por um provete das betonilhas de referência (R150, R250 e R400). Os provetes das betonilhas são constituídos por dois blocos sobrepostos, de forma a poderem ser colocados dois termopares na interface de contacto (termopares TP3, no esquema das Figuras 6.4 e 6.5).

Procedeu-se ao ajuste das aproximações analíticas aos resultados experimentais, das betonilhas leves (M150, M250 e M400) e das betonilhas de referência (R150, R250 e R400). Nas Figuras 6.4 e 6.5 apresentam-se as melhores aproximações obtidas por via analítica e por via experimental, apenas para os sistemas que integram as betonilhas leves (M150, M250 e M400), na fase de arrefecimento e de aquecimento, respectivamente. Para os sistemas que integram as betonilhas R150, R250 e R400, as melhores aproximações foram semelhantes às exibidas nas Figuras 6.4 e 6.5. Nestas figuras, as linhas contínuas representam os resultados obtidos por via analítica e as linhas descontínuas com marcadores os resultados experimentais. As respostas experimentais, obtidas em cada interface do sistema, correspondem à média aritmética das leituras realizadas por dois termopares localizados na mesma interface ao longo da direcção x . Interessa salientar que, sendo a difusão de calor unidimensional (1D), as temperaturas registadas em receptores colocados em qualquer posição ao longo da direcção x são iguais.

Na Tabela 6.3, indicam-se os valores do calor específico obtidos de forma indirecta, *i.e.* através da melhor aproximação das curvas analíticas às curvas experimentais. Os resultados experimentais, apresentados nas Figuras 6.4 e 6.5, são semelhantes em toda a janela do tempo considerada, *i.e.* quando as unidades de aquecimento e de arrefecimento se encontram a funcionar, quando se estabelece o regime estacionário do fluxo de calor, bem como no restante período, quando as unidades de aquecimento e de arrefecimento deixam de funcionar. Importa ainda referir que, no início do processo, todos os receptores (termopares) registam valores de temperatura similares aos da temperatura ambiente, o que satisfaz as condições iniciais definidas na simulação analítica.

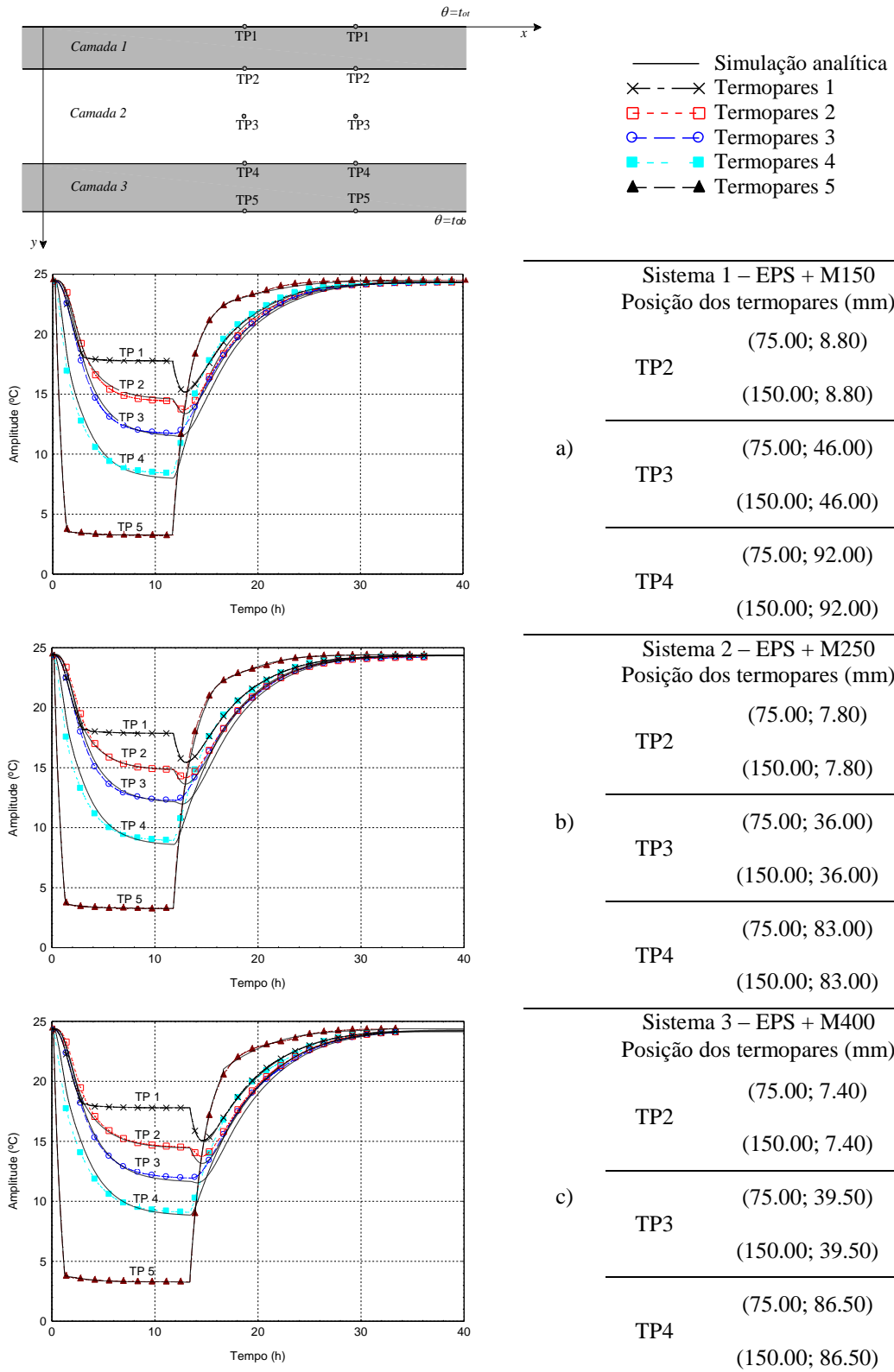


Figura 6.4 – Variação de temperaturas nas interfaces das camadas dos sistemas, na fase de arrefecimento. Resultados analíticos (linhas contínuas) e experimentais (descontínuas com marcadores) para os sistemas constituídos por: a) EPS e M150; b) EPS e M250; c) EPS e M400.

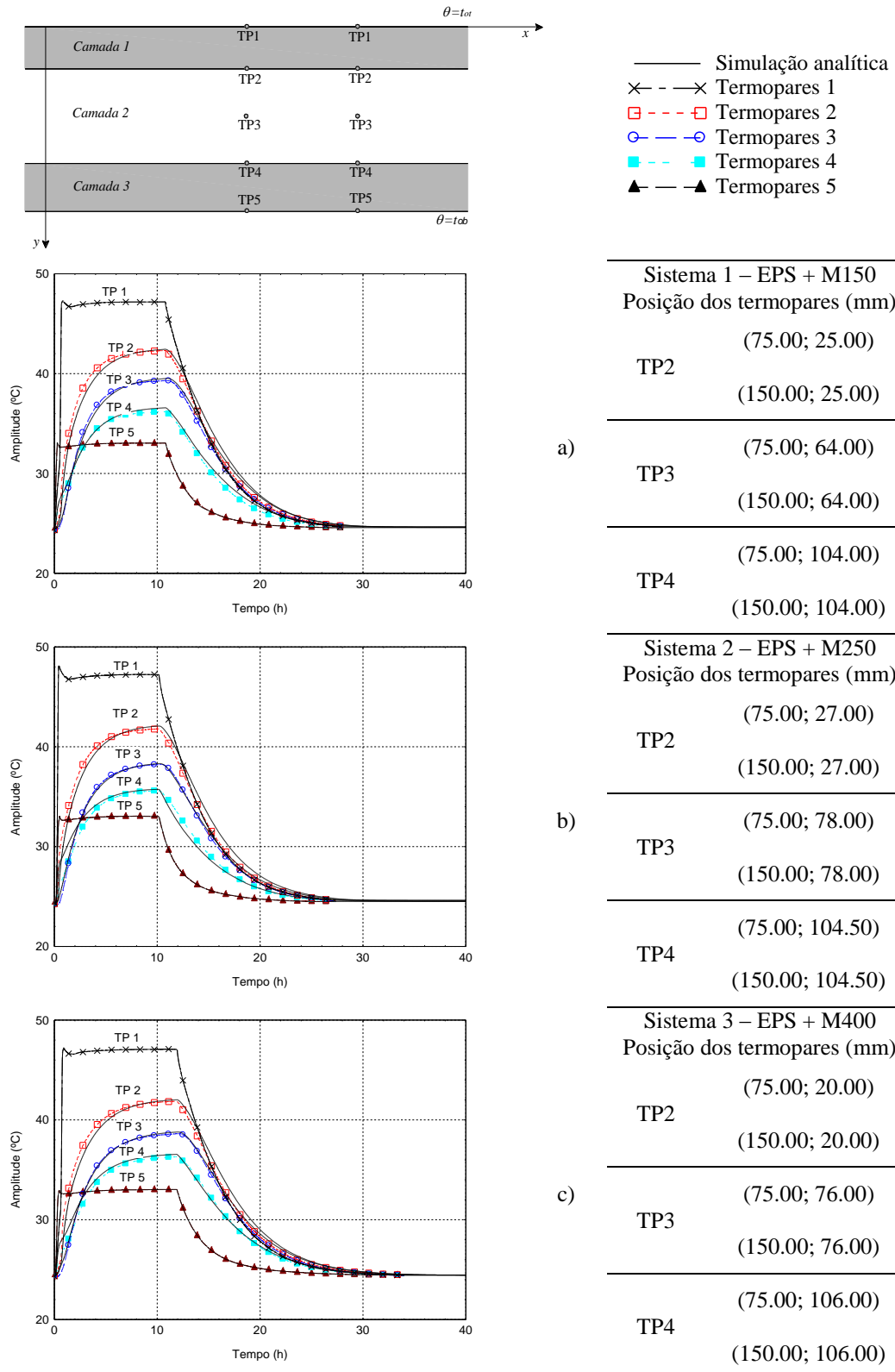


Figura 6.5 – Variação de temperaturas nas interfaces das camadas dos sistemas, na fase de aquecimento. Resultados analíticos (linhas contínuas) e experimentais (descontínuas com marcadores) para os sistemas constituídos por: a) EPS e M150; b) EPS e M250; c) EPS e M400.

Tabela 6.3 – Calor específico, c, e difusividade térmica, K, dos materiais aplicados.

Materiais	Calor específico, c [J/(kg °C)]	Difusividade Térmica, K (*) [m ² /s]
EPS	1430.0	2.16×10 ⁻⁷
ICB	1560.0	2.44×10 ⁻⁷
M150	950.0	3.95×10 ⁻⁷
M250	720.0	4.02×10 ⁻⁷
M400	700.0	5.05×10 ⁻⁷
R150	900.0	4.76×10 ⁻⁷
R250	850.0	5.14×10 ⁻⁷
R400	750.0	5.27×10 ⁻⁷
Betão	880.0	6.92×10 ⁻⁷

Da comparação das variações de temperatura em cada interface dos três sistemas de pavimento que integram as betonilhas com ECG analisados, é possível afirmar que, na fase de arrefecimento, os sistemas com as betonilhas M150 e M250 demoram sensivelmente o mesmo tempo para atingir o regime estacionário, *i.e.* cerca de 12 h. Este período de tempo é menor do que o necessário ao sistema de pavimento que integra M400 (cerca de 14 h). Na fase de aquecimento, M250 é o sistema que apresenta o menor tempo de resposta (cerca de 10 h), o que significa que, neste sistema, se estabelece mais depressa o regime estacionário do fluxo de calor, do que nos restantes sistemas analisados. O sistema de pavimento que integra a betonilha M400 é o que apresenta o maior tempo de resposta (cerca de 22 h) para atingir novamente a temperatura inicial de ensaio, a partir do momento em que as unidades de aquecimento/arrefecimento são desligadas.

6.4 ATRASO TÉRMICO E TRANSMISSÃO DE CALOR DE SISTEMAS DE PAVIMENTOS

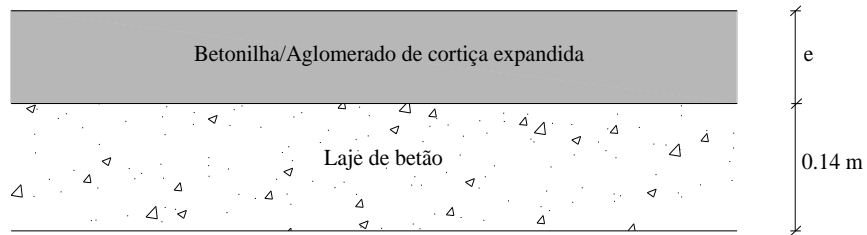
O atraso térmico de pavimentos constituídos por betão, ICB e betonilhas de referência (R150, R250 e R400) e betonilhas com ECG (M150, M250 e M400) será, seguidamente, determinado, recorrendo ao modelo analítico descrito na secção 6.2. De acordo com o anteriormente mencionado, entende-se por atraso térmico o período de tempo necessário para que o valor da temperatura registado numa das faces de um sistema multi-camada se manifeste na face oposta do mesmo sistema. Assim, o valor das temperaturas nas faces receptoras dos pavimentos será determinado através do referido modelo analítico, porém previamente manipulado para incluir um meio infinito em contacto com a superfície superior.

Na Figura 6.6, esquematizam-se os quatro sistemas de pavimento estudados. Estes sistemas são constituídos por uma laje de betão e por camadas de betonilhas e ICB. É importante salientar que a integração de ICB nos sistemas de pavimento se justifica pelo facto de as superfícies expostas das betonilhas com ECG serem heterogéneas, conseguindo-se, desta forma, superfícies mais regulares. Além deste motivo, também se pretende avaliar a influência da presença de ICB (isolante térmico) naquelas soluções construtivas. O isolamento térmico destes sistemas de pavimento é assegurado pelos ECG incorporados nas betonilhas e por ICB. O atraso térmico foi determinado para várias espessuras, e , dos materiais de isolamento, *i.e.*, de 15 mm até 150 mm, usando as propriedades físicas e térmicas apresentadas nas Tabelas 6.1 e 6.3.

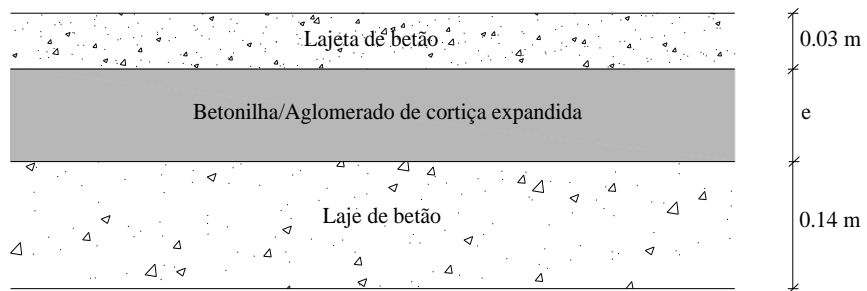
O modelo analítico impõe uma variação sinusoidal de temperatura na superfície inferior de cada sistema de pavimento, que simula a alteração de temperatura ao longo de 2 dias, como se ilustra na Figura 6.7. O modelo adoptado considera que a temperatura inicial, em todos os sistemas, é 20°C e que existe uma variação de 10°C em cada período de 24 h. Admite-se, ainda, que o meio que permanece em contacto com a face receptora superior do sistema de pavimento é o ar (com $\lambda=0.026$ W/(m°C), $\rho=1.2928$ kg/m³ e $c=1000.0$ J/kg°C).

Os resultados analíticos foram determinados no domínio da frequência, entre 0.0 Hz e 0.02370 Hz, com incrementos de frequência iguais a 5.787×10^{-6} Hz, o que determina uma janela de análise no tempo de 48 h. Com o intuito de se obterem as temperaturas no domínio do tempo, aplicou-se uma transformada numérica rápida de Fourier no domínio da frequência.

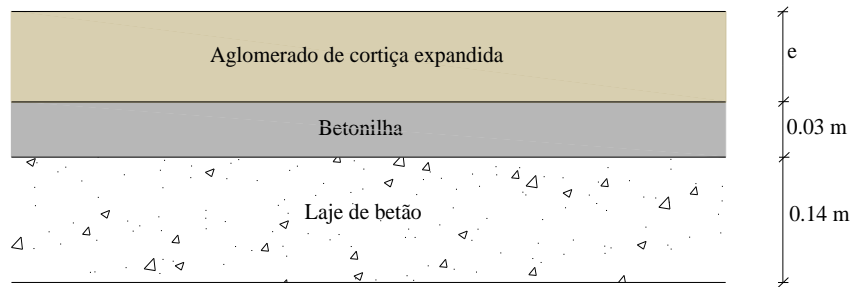
Na Figura 6.8, ilustra-se a evolução da temperatura na superfície inferior exposta e na superfície receptora para o Caso 1 (Figura 6.6 *a*)) com uma betonilha M150 de 60 mm de espessura. Na Figura 6.8, a linha azul representa a variação de temperatura incidente, enquanto a linha vermelha com os marcadores representa a evolução da temperatura na face receptora do sistema de pavimento. Nesta figura, o atraso térmico é dado pela diferença entre os instantes T1 e T2, *i.e.* (T1-T2).



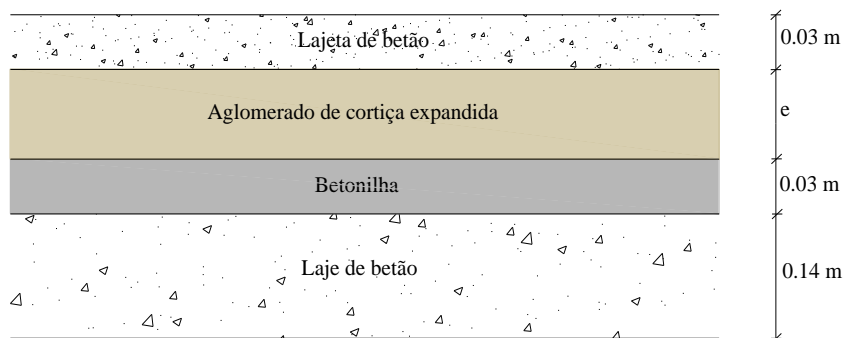
a) Caso 1



b) Caso 2



c) Caso 3



d) Caso 4

Figura 6.6 – Constituição dos sistemas de pavimentos estudados.

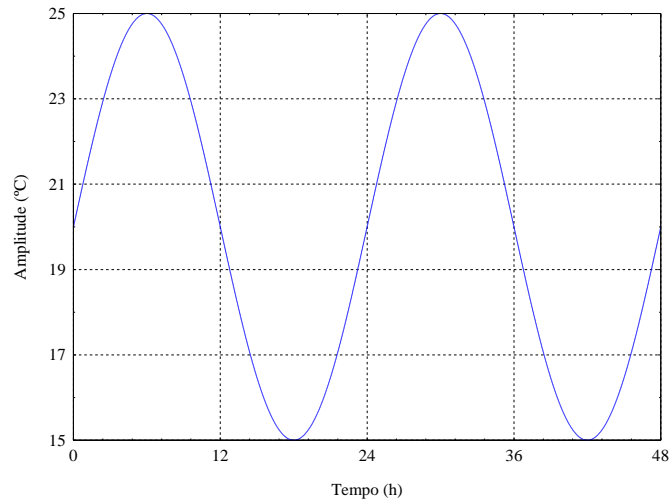


Figura 6.7 – Evolução da fonte de calor.

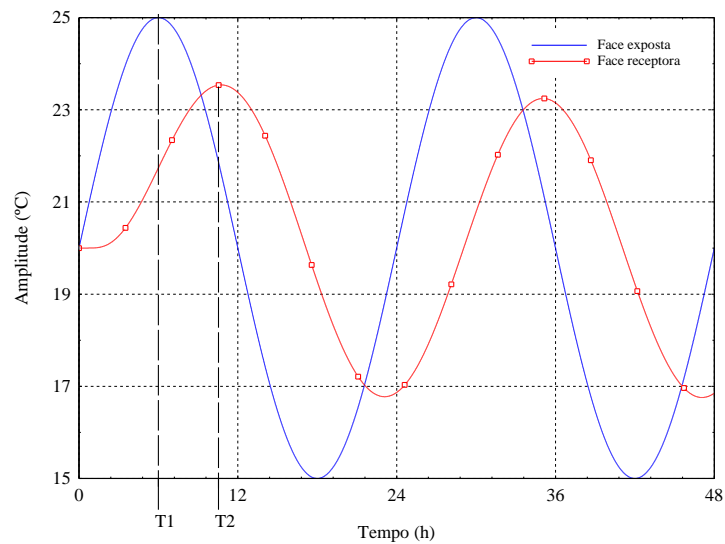


Figura 6.8 – Resultados analíticos: variação de temperatura na face exposta (linha azul) e na face receptora (linha vermelha com marcadores) para um sistema de pavimento constituído por uma laje de betão de 0.14 m de espessura e uma betonilha M150 de 0.06 m de espessura (Caso1).

Os resultados das simulações realizadas com o modelo analítico são apresentados nas Figuras 6.9 (Caso 1), 6.10 (Caso 2), 6.11 (Caso 3) e 6.12 (Caso 4). Nas referidas figuras, o atraso térmico é representado através das linhas contínuas, enquanto a evolução do coeficiente de transmissão térmica é dado pelas linhas interrompidas.

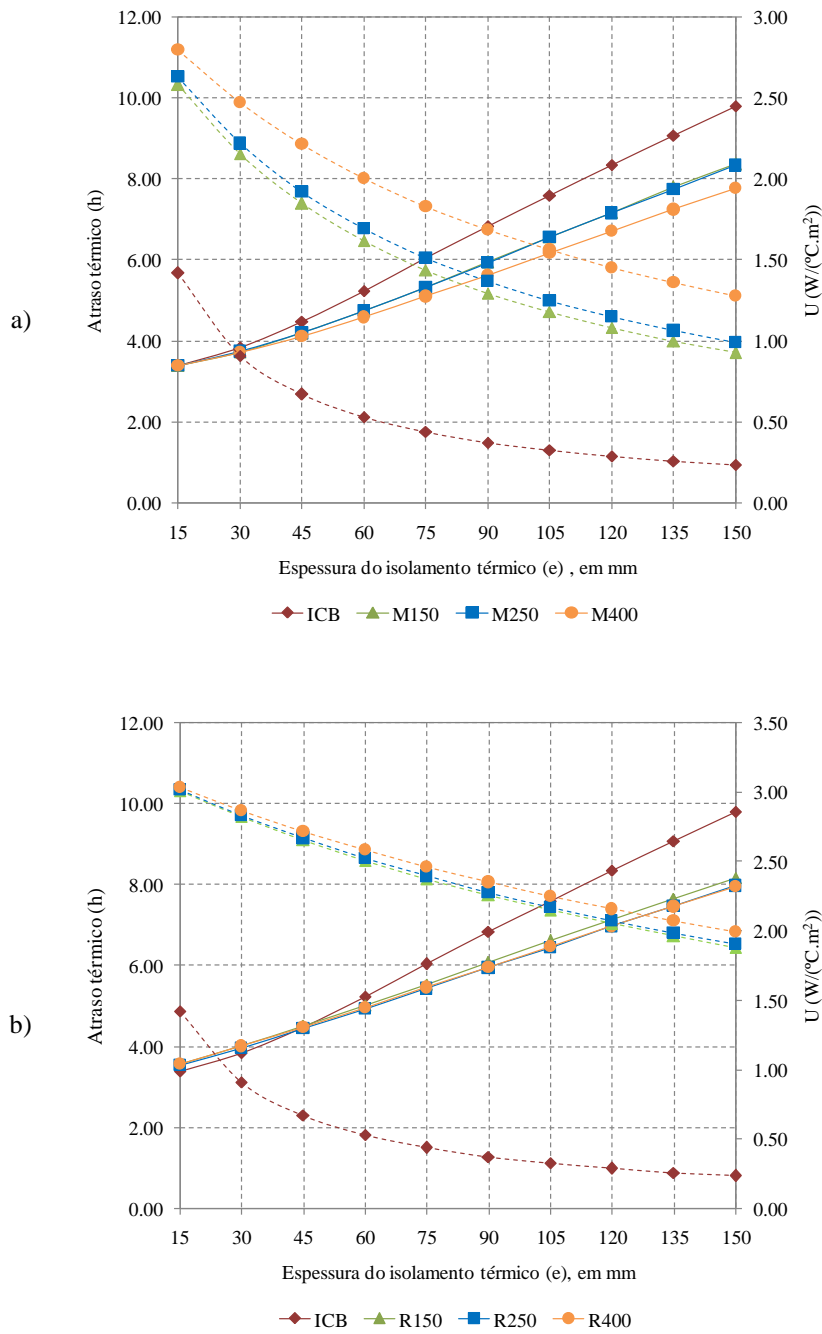


Figura 6.9 – Caso 1: Atraso térmico (linhas contínuas) e coeficiente de transmissão térmica (linhas descontínuas), U, do sistema de pavimento: a) Sistemas que incorporam betonilhas leves; b) Sistemas que incorporam betonilhas de referência.

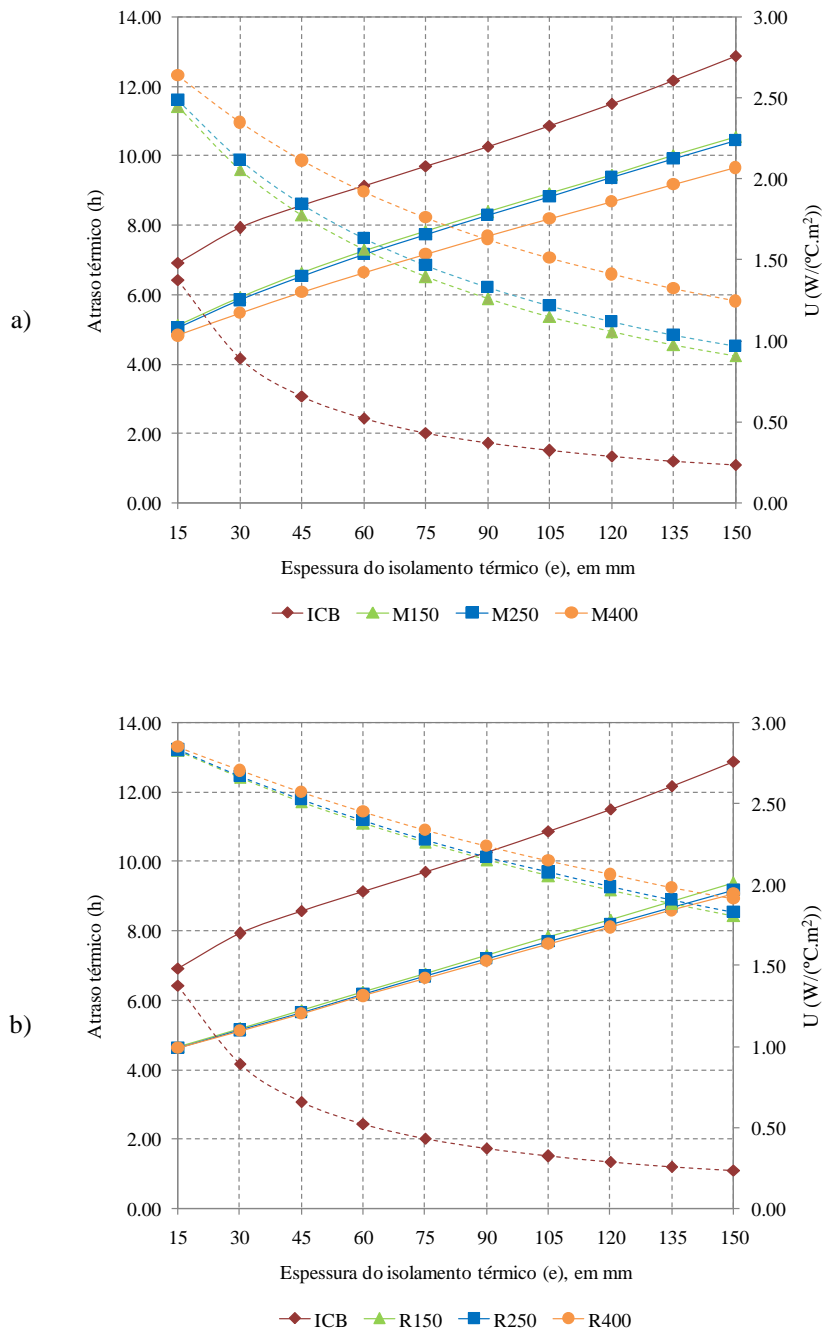


Figura 6.10 – Caso 2: Atraso térmico (linhas contínuas) e coeficiente de transmissão térmica (linhas descontínuas), U, do sistema de pavimento: a) Sistemas que incorporam betonilhas leves; b) Sistemas que incorporam betonilhas de referência.

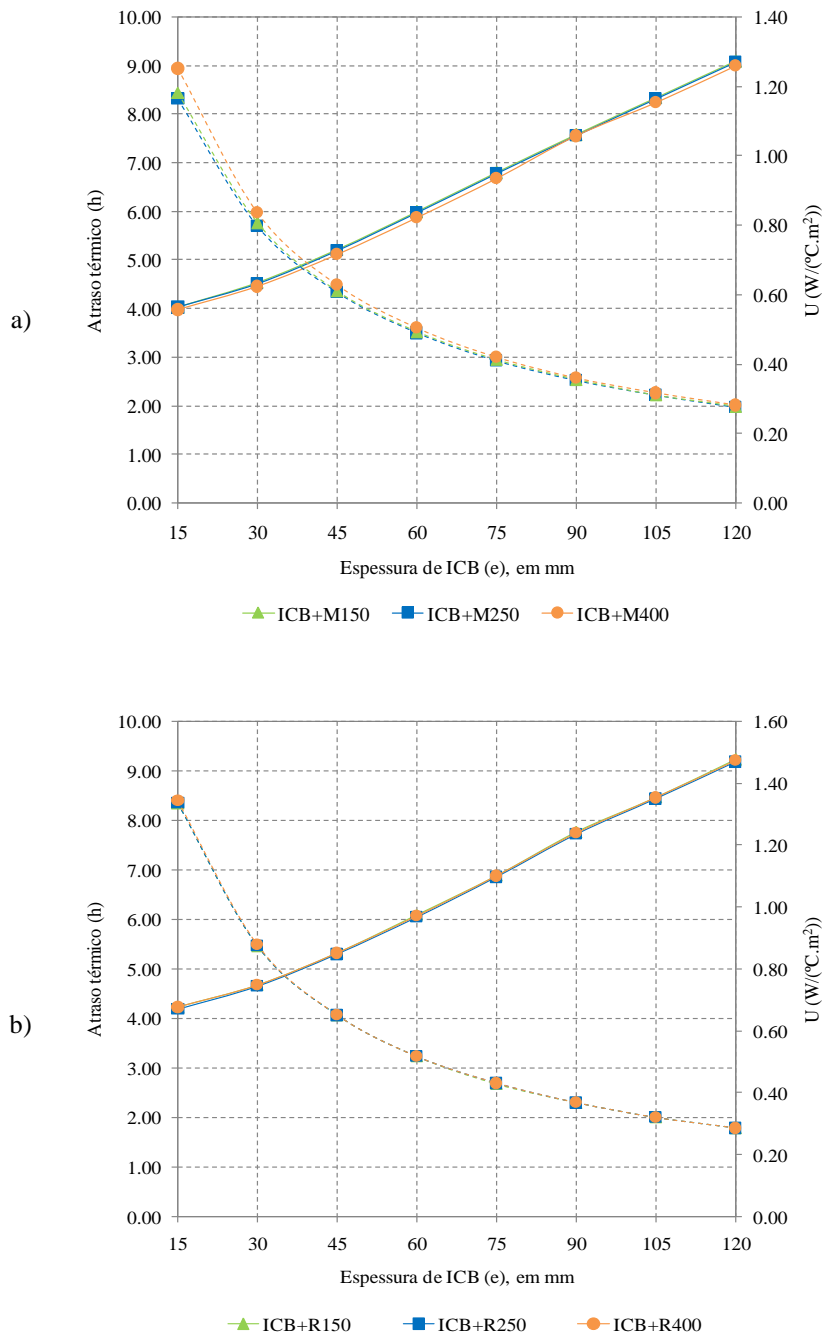


Figura 6.11 – Caso 3: Atraso térmico (linhas contínuas) e coeficiente de transmissão térmica (linhas descontínuas), U, do sistema de pavimento: a) Sistemas que incorporam betonilhas leves; b) Sistemas que incorporam betonilhas de referência.

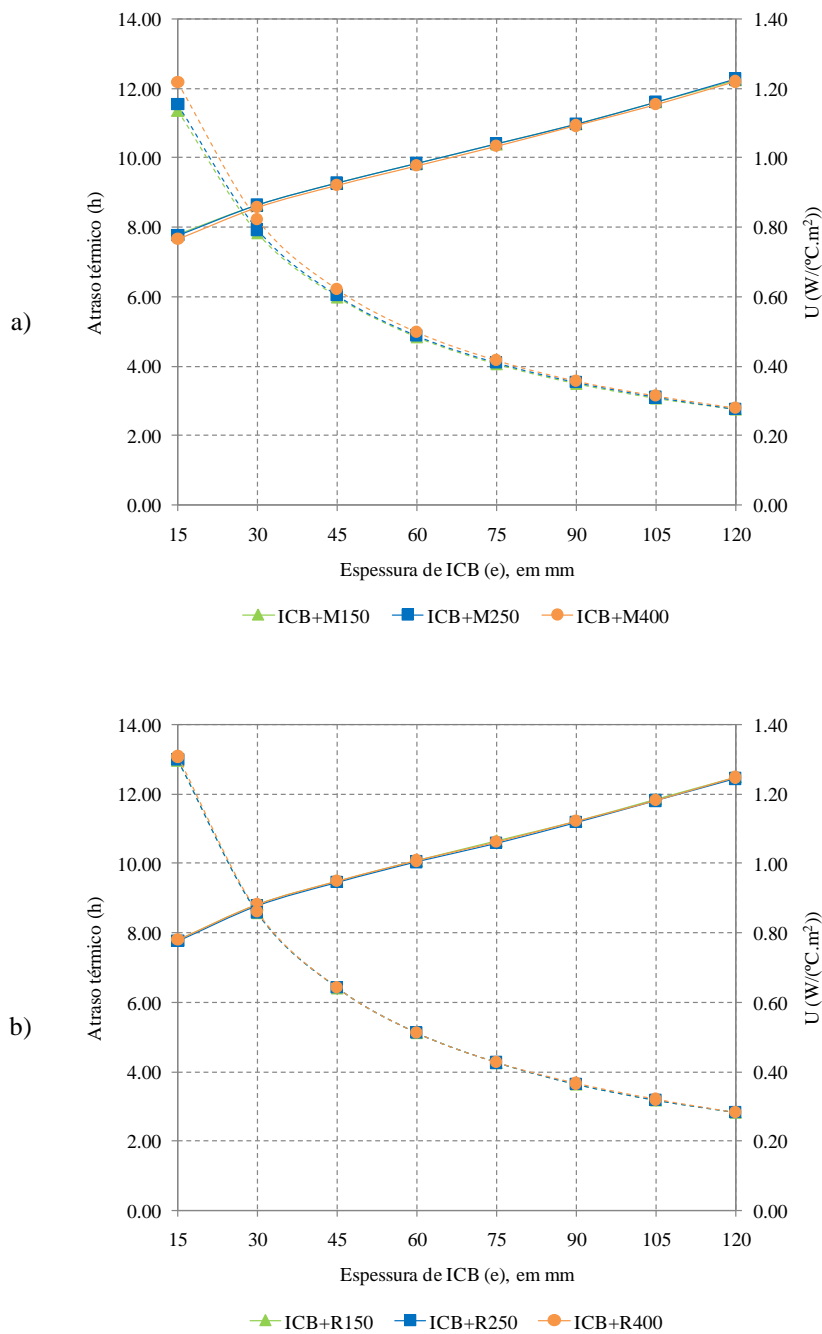
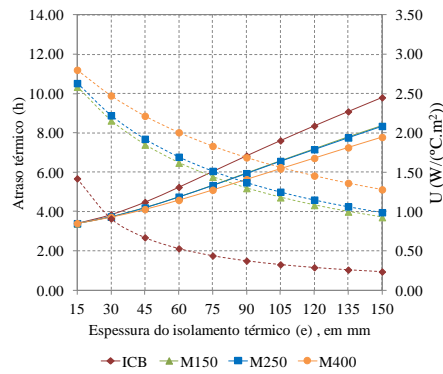
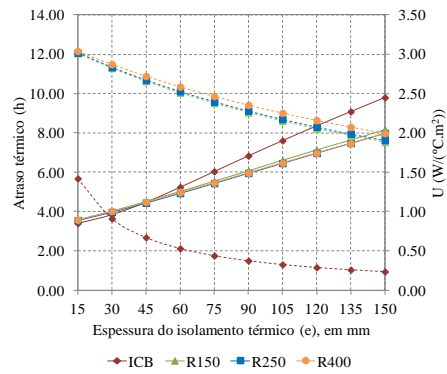


Figura 6.12 – Caso 4: Atraso térmico (linhas contínuas) e coeficiente de transmissão térmica (linhas descontínuas), U, do sistema de pavimento: a) Sistemas que incorporam betonilhas leves; b) Sistemas que incorporam betonilhas de referência.

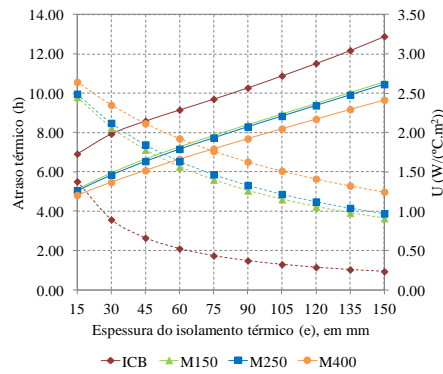
Na Figura 6.13 justapõem-se todos os gráficos, representados nas Figuras 6.9 a 6.12, de forma a facilitar a sua comparação.



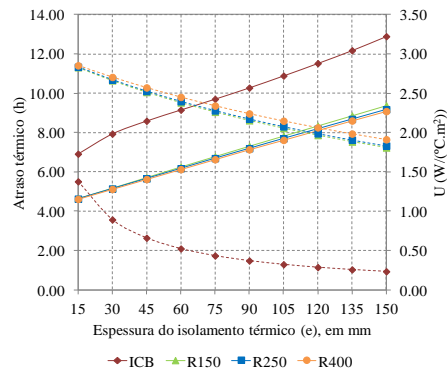
a) Caso 1 – Com as betonilhas leves.



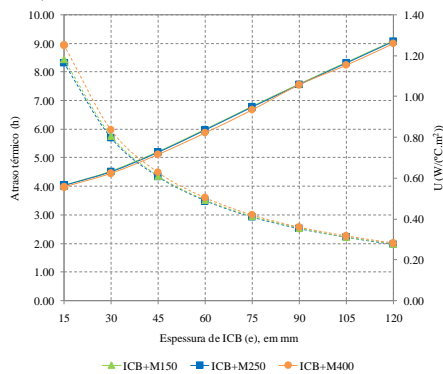
b) Caso 1 – Com as betonilhas de referência.



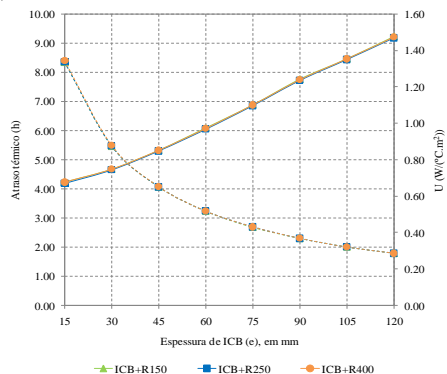
c) Caso 2 – Com as betonilhas leves.



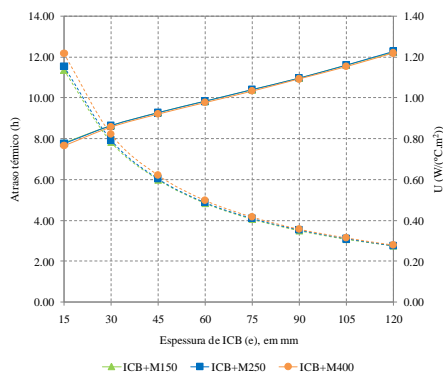
d) Caso 2 – Com as betonilhas de referência.



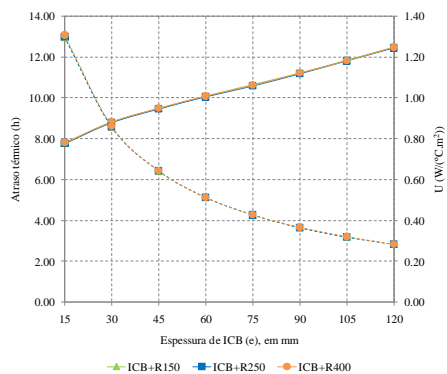
e) Caso 3 – Com ICB e as betonilhas leves.



f) Caso 3 – Com ICB e as betonilhas de referência.



g) Caso 4 – Com ICB e as betonilhas leves.



h) Caso 4 – Com ICB e as betonilhas de referência.

Figura 6.13 – Atraso térmico (linhas contínuas) e coeficiente de transmissão térmica (linhas descontínuas), U, dos sistemas de pavimentos: Casos 1 a 4.

A análise dos resultados das simulações realizadas com o modelo analítico permite afirmar que o atraso térmico aumenta com o aumento da espessura dos materiais de isolamento aplicados nos sistemas de pavimento estudados e que os coeficientes de transmissão térmica, U , diminuem à medida que a espessura dos materiais de isolamento térmico aumentam. Nos Casos 1 e 2, os maiores atrasos térmicos e os menores U correspondem aos sistemas de pavimento que integram as camadas de ICB sobre a laje de betão armado, pelo que se pode afirmar que a colocação da camada de ICB em substituição da camada de betonilha tem como efeito o aumento do atraso térmico.

Da comparação dos valores de U entre os Casos 1 e 2 com betonilhas verifica-se, como expectável, que no Caso 2, os valores de U são ligeiramente inferiores. No Caso 1, as betonilhas leves M150 e M250 permitem maior atraso térmico do que as betonilhas R150 e R250 (no caso da betonilha M150, a partir da espessura de 90 mm). Constata-se igualmente que a integração da betonilha R400 neste sistema de pavimento possibilita maior atraso térmico do que a betonilha M400. Os coeficientes de transmissão térmica, U , dos sistemas que integram as betonilhas leves, M150, M250 e M400, são inferiores aos dos sistemas que integram as betonilhas R150, R250 e R400 para as mesmas espessuras do Caso 1. No Caso 2, as betonilhas M150, M250 e M400 evidenciam maiores atrasos térmicos do que as betonilhas R150, R250 e R400. Relativamente aos sistemas de pavimento com camadas de betonilha, os que integram as betonilhas M150 e M250 são os que apresentam os maiores atrasos térmicos, enquanto o sistema que integra a betonilha R400 exibe os menores valores de atraso térmico.

Os resultados das simulações relativas ao Caso 3 revelam que, tanto os valores de atraso térmico como de U são similares entre si. No entanto, os sistemas que integram (ICB+R150) e (ICB+R250) são os que evidenciam maiores atrasos térmicos, enquanto o sistema constituído por (ICB+M400) é o que apresenta o menor atraso térmico. No que se refere aos valores de U , as soluções com (ICB+M150), (ICB+M250) e (ICB+M400) demonstram menor transmissão térmica do que as correspondentes soluções com betonilhas de referência, *i.e.*, (ICB+R150), (ICB+R250) e (ICB+R400), designadamente até à espessura de 75 mm da camada de ICB (a partir desta espessura os valores de U são praticamente iguais para todas as betonilhas).

No Caso 4, apesar de não existirem diferenças significativas entre os atrasos térmicos das betonilhas leves e das betonilhas de referência, estas últimas revelam atrasos térmicos ligeiramente superiores às das betonilhas leves. Os valores de U divergem ligeiramente até à espessura de 75 mm de ICB, correspondendo, até à mesma espessura, os maiores valores às betonilhas de referência, passando depois a serem praticamente iguais em todas as betonilhas. Comparando os valores de atraso térmico dos Casos 3 e 4, verifica-se que o Caso 4 apresenta valores significativamente superiores (*e.g.* para a espessura de 15 mm de ICB, os atrasos

térmicos médios dos Casos 3 e 4 são 4 h e 7.8 h, respectivamente; para a espessura de 120 mm de ICB, os atrasos térmicos médios dos Casos 3 e 4 são 9.1 h e 12.2 h, respectivamente).

Os resultados relativos aos sistemas de pavimento dos Casos 3 e 4 revelam que, apesar dos atrasos térmicos dos sistemas que integram as betonilhas de referência serem superiores aos correspondentes sistemas com as betonilhas leves, os coeficientes de transmissão térmica destes últimos (*i.e.* sistemas com as betonilhas leves) são menores do que os dos sistemas com as betonilhas de referência, inferindo-se que reduzidas transmissões térmicas não são sinónimo de elevados atrasos térmicos. Da análise dos resultados, é ainda possível afirmar que o atraso térmico aumenta com o número de camadas (os Casos 2 e 4 apresentam maiores atrasos térmicos do que os Casos 1 e 3, respectivamente), como já tinha sido referido por Simões *et al.* [10].

6.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

No presente capítulo, apresentaram-se os resultados analíticos do atraso térmico de sistemas de pavimentos constituídos por diversas camadas de materiais, designadamente betão, betonilhas leves e de referência (fabricadas com cimento *Portland*, areia, ECG e água) e ICB.

O modelo analítico usado utiliza funções de Green para fontes harmónicas planas de calor colocadas em meio infinito e foi descrito na secção 6.2. As respostas foram determinadas no domínio da frequência e posteriormente convertidas em respostas no tempo, através de transformadas inversas de Fourier.

Na secção 6.3 descreveram-se os procedimentos experimentais. A concretização da simulação carece do conhecimento das propriedades térmicas dos materiais, designadamente o coeficiente de condutibilidade térmica e o calor específico, e da massa volúmica. A massa volúmica e a condutibilidade térmica das betonilhas foram determinadas experimentalmente nos capítulos anteriores. O calor específico das betonilhas, materiais heterogéneos, foi determinado por um processo indirecto, descrito no presente capítulo, e que conjuga resultados experimentais de um ensaio de condução de calor através de um provete de betonilha com um modelo analítico.

Foram estudados quatro sistemas de pavimentos constituídos por uma laje de betão armado e betonilha de espessura variável (Caso 1), uma laje de betão armado, betonilha de espessura variável e uma lajeta de betão armado (Caso 2), uma laje de betão armado, betonilha, ICB de espessura variável (Caso 3) e uma laje de betão armado, betonilha, ICB de espessura variável e uma lajeta de betão armado (Caso 4). Os resultados da simulação analítica, apresentados na secção 6.4, revelaram que o atraso térmico aumenta com o aumento da

espessura dos materiais de isolamento aplicados, enquanto os coeficientes de transmissão térmica diminuem. Verificou-se, ainda, que o atraso térmico aumenta com o aumento do número de camadas dos sistemas de pavimento. Ao contrário do que seria expectável, as betonilhas com ECG não apresentam, em todos os casos estudados atrasos térmicos superiores aos das betonilhas de referência, nas mesmas aplicações e com as mesmas dosagens de cimento.

Foram ainda calculados os coeficientes de transmissão térmica, U , de vários sistemas de pavimentos estudados. Nos Casos 1 e 2, os menores valores de U correspondem às soluções que integram ICB e, tal como seria expectável, os sistemas com as betonilhas leves apresentam menores valores de U do que os correspondentes com as betonilhas de referência. Nos Casos 3 e 4, não existe uma diferença significativa entre os valores de U das diversas soluções. No entanto, até à espessura de 75 mm de ICB, é notório que os sistemas de pavimento com as betonilhas leves apresentam menores valores de U do que os correspondentes sistemas que integram as betonilhas de referência.

6.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Roucoult, J. M.; Douzane, O.; Langlet, T. 1999. Incorporation of thermal inertia in the aim of installing a natural nighttime ventilation system in buildings. *Energy and Buildings*. Vol. 29, pp. 129-133.
- [2] Antonopoulos (a), K. A.; Koronaki, E. P. 2000. Effect of indoor mass on the time constant and thermal delay of buildings. *Int. J. Energy Res.* Vol. 24, pp. 391-402.
- [3] Ogoli, David Mwale. 2003. Predicting indoor temperatures in closed buildings with high thermal mass. *Energy and Buildings* Vol. 35, pp. 851–862.
- [4] Pfafferott, Jens; Herkel, Sebastian e Wapler, Jeannette. 2005. Thermal building behaviour in summer: long-term data evaluation using simplified models. *Energy and Buildings*. Vol. 37, pp. 844-852.
- [5] Aste, Niccolo; Angelotti, Adriana; Buzzet, Michela. 2009. The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings. *Energy and Buildings*. Vol. 41, pp. 1181-1187.
- [6] Mavromatidis, Lazaros Elias; Mankibi, Mohamed EL; Michel, Pierre; Santamouris, Mat. 2012. Numerical estimation of time lags and decrement factors for wall complexes including Multilayer Thermal Insulation, in two different climatic zones. *Applied Energy*. Vol. 92, pp. 480-491.
- [7] Antonopoulos, K. A.; Tzivanidis, C. 1995. A correlation for the thermal delay of buildings. *Renewable Energy*. Vol. 6 (No. 7), pp. 687-699.

- [8] Antonopoulos (b), K. A. e Koronaki, E. P. 2000. Thermal parameter components of building envelope. *Applied Thermal Engineering* Vol. 20, pp. 1193-1211.
- [9] Kravvaritis, E.D.; Antonopoulos, K.A.; Tzivanidis, C. 2011. Experimental determination of the effective thermal capacity function and other thermal properties for various phase change materials using the thermal delay method. *Applied Energy*. Vol. 88, pp. 4459–4469.
- [10] Simões (a), I.; Simões, N.; Tadeu, A. 2012. Thermal delay simulation in multilayer systems using analytical solutions. *Energy and Buildings* Vol. 49, pp. 631–639.
- [11] Alhama, F.; Lopez-Sanchez, J. F.; Gonzalez-Fernandez, C. F. 1997. Heat conduction through a multilayered wall with variable boundary conditions. *Energy* Vol. 8, pp. 797-803.
- [12] Tadeu, António; António, Julieta; Mateus, Diogo. 2004. Sound insulation provided by single and double panel walls—a comparison of analytical solutions versus experimental results. *Applied Acoustics*. Vol. 65, pp. 15–29.
- [13] Sambou, V.; Lartigue, B.; Monchoux, F.; Adj, M. 2008. Theoretical and experimental study of heat transfer through a vertical partitioned enclosure: Application to the optimization of the thermal resistance. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 28, pp. 488–498.
- [14] Vigran, T. E. 2010. Sound transmission in multilayered structures – Introducing finite structural connections in the transfer matrix method *Applied Acoustics*. Vol. 71, pp. 39–44.
- [15] Fouladi, Mohammad Hosseini; Mohd Nor, Mohd Jailani; Ayub, Md.; Leman, Zulkarnain Ali. 2010. Utilization of coir fiber in multilayer acoustic absorption panel. *Applied Acoustics*. Vol. 71, pp. 241–249.
- [16] Yagi, Koichi; Halada, Kohmei. 2001. Materials development for a sustainable society. *Materials and Design*. Vol. 22, pp. 143-146.
- [17] Raut, S.P.; Ralegaonkar, R.V.; Mandavgane, S.A. 2011. Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-create bricks. *Construction and Building Materials*. Vol. 25, pp. 4037–4042.
- [18] Ajibola, Kolawole; Onabanjo, Babajode O. Investigation of Cocos nucifera as a potential insulator for buildings. *Renewable Energy*. Vol. 6 (No.1), pp. 81-84.
- [19] Khedari, Joseph; Suttisonk, Borisut; Pratinthong, Naris; Hirunlabh, Jongjit. 2010. New lightweight composite construction with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23, pp. 65-70.
- [20] McBride, S. P., Shukla, A, Bose, A. 2002. Processing and characterization of a lightweight concrete using cenospheres. *Journal of Materials Science*. Vol. 37, pp. 4217-4225.

- [21] Gonçalves, M. R. F.; Bergmann, C. P. 2007. Thermal insulators made with rice husk ashes: Production and correlation between properties and microstructure. *Construction and Building Materials*. Vol. 21, pp. 2059-2065.
- [22] Benazzouk, A.; Douzane, O.; Mezreb, K.; Laidoudi, B.; Quéneudec, M. 2008. Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles. Experimental study and modelling. *Construction and Building Materials*. Vol. 22, pp. 573-579.
- [23] Mounanga, P.; Gbongbon, W.; Poullain, P.; Turcry, P. 2008. Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 30, pp. 806-814.
- [24] Roma Jr., Luiz C.; Martello, Luciane S.; Sava, Holmer. 2008. Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers. *Construction and Building Materials*. Vol. 22, pp. 668-674.
- [25] Karade, S. R. 2010. Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. *Construction and Building Materials*. Vol. 24, pp. 1323-1330.
- [26] Simões, Nuno; Tadeu, António. 2006. Transient conduction and convection heat transfer across a multi-layer floor subjected to multiple heat sources. *Building and Environment*. Vol. 41, pp. 1299-1310.
- [27] Tadeu, António; Simões, Nuno. 2006. Three-dimensional fundamental solutions for transient heat transfer by conduction in an unbounded medium, half-space, slab and layered media. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. Vol. 30, pp. 338-349.
- [28] Simões (b), N.; Simões, I.; Tadeu, A.; Vasconcellos, C. A. B.; Mansur, W. J. 2012. 3D transient heat conduction in multilayer systems - Experimental validation of semi-analytical solution. *International Journal of Thermal Sciences*. Vol. 57, pp. 192-203.
- [29] Simões (c), I.; Simões, N.; Tadeu, A.; Reis, M.; Vasconcellos, C. A. B.; Mansur, W. J. 2012. Experimental validation of a frequency domain BEM model to study 2D and 3D heat transfer by conduction. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. Vol. 36, pp. 1686-1698.
- [30] Simões (d), N.; Tadeu, A.; António, J.; Mansur, W. 2012. Transient heat conduction under nonzero initial conditions: A solution using the boundary element method in the frequency domain. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. Vol. 36, pp. 562-567.
- [31] Hameury, Stéphane; Lundström, Tor. 2004. Contribution of indoor exposed massive wood to a good indoor climate: in situ measurement campaign. *Energy and Buildings*. Vol. 36, pp. 281-292.

Capítulo 7

Considerações Finais

ÍNDICE

- 7.1 Síntese das Conclusões
- 7.2 Perspectivas de Trabalhos Futuros

7.1 SÍNTESE DAS CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido, no âmbito da presente tese, pretendeu contribuir para o estudo de betonilhas destinadas à realização de camadas de forma sobre lajes de betão armado, incorporando um subproduto da indústria corticeira, os granulados de cortiça expandida (ECG). Muito embora a incorporação deste tipo de agregados, em camadas de enchimento, ter algumas aplicações na indústria da construção portuguesa, subsistia a ausência de uma caracterização adequada, designadamente sob os pontos de vista higrotérmico e acústico.

O presente estudo recorreu à avaliação experimental de várias propriedades dos materiais estudados e do seu comportamento quando integrados em sistemas de pavimentos, através da realização de ensaios laboratoriais. O desempenho destes sistemas de pavimentos foi também simulado através da aplicação de soluções analíticas desenvolvidas no Centro de Investigação em Ciências da Construção (CICC).

O trabalho realizado envolveu o desenvolvimento de três betonilhas fabricadas com diferentes dosagens de cimento, areia, ECG e água e de três betonilhas fabricadas com as mesmas dosagens de cimento, areia e água (*i.e.* betonilhas de referência). As dosagens de cimento foram 150, 250 e 400 kg/m³, resultando nas designações M150, M250 e M400, das betonilhas com ECG, e R150, R250 e R400, das betonilhas de referência. As referidas betonilhas constituíram a principal base de estudo para o desenvolvimento da presente dissertação.

O trabalho experimental que possibilitou a formulação das betonilhas beneficiou do estudo desenvolvido no âmbito do projecto de investigação POCTI/ECM/55889/04, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, sobre a caracterização de betões leves estruturais e de argamassas, cujas composições foram desenvolvidas no CICC. Estas argamassas são constituídas por cimento e água e diferentes tipos de agregados, concretamente areia, ECG, agregados de argila expandida e grânulos de poliestireno expandido (EPS). Os betões leves estruturais contêm cimento, brita, areia, água e proporções variáveis de ECG, em substituição de areia. Os referidos materiais compósitos de base cimentícia foram igualmente objecto de estudo no presente trabalho, de forma a possibilitar a comparação de resultados: as argamassas, por incluírem agregados habitualmente usados no fabrico de betonilhas, e os betões leves estruturais, por conterem diferentes proporções de ECG, podendo-se, assim, avaliar a sua influência no desempenho do material compósito. Em alguns domínios de caracterização, foram, ainda, considerados dois betões estruturais: um constituído por cimento, brita, areia e água, e o outro com os mesmos constituintes e com introdutor de ar.

A definição das composições das betonilhas com ECG e das betonilhas de referência implicou a realização de um conjunto de trabalhos preliminares que consistiram na caracterização física dos materiais granulares usados (areias e ECG) e posteriormente na formulação de diversas betonilhas experimentais, cujos desempenhos mecânicos e consistência, a par da maior quantidade possível de ECG incorporada, constituíram os princípios orientadores para a definição das composições das betonilhas leves.

Determinaram-se as massas volúmicas aparentes e as resistências mecânicas à compressão das betonilhas leves e das betonilhas de referência.

A caracterização do comportamento higrotérmico das betonilhas com ECG compreendeu a determinação do coeficiente de condutibilidade térmica, das curvas higroscópicas de adsorção, dos coeficientes de permeabilidade ao vapor de água e os coeficientes de absorção de água por imersão parcial. As argamassas foram caracterizadas em termos da sua condutibilidade térmica, curvas higroscópicas de adsorção e de desadsorção, curvas de retenção e permeabilidade ao vapor de água. Os betões leves estruturais foram caracterizados em termos da sua higroscopicidade, na fase de adsorção e na fase de desadsorção, desempenho no domínio super-higroscópico, permeabilidade ao vapor de água e absorção de água por imersão parcial. Foram, ainda, determinadas as curvas de adsorção e de desadsorção de dois betões estruturais contendo cimento, brita, areia e água, e introdutor de ar.

No âmbito da caracterização térmica em regime permanente, verificou-se que a incorporação de ECG nas betonilhas permite reduzir a sua condutibilidade térmica. No entanto, a condutibilidade térmica das betonilhas aumenta à medida que se aumenta a dosagem de cimento na sua composição.

Das argamassas estudadas, a que contém ECG é a que apresenta a menor condutibilidade térmica.

Na perspectiva de avaliar a higroscopicidade de ECG, determinou-se igualmente a curva de adsorção de uma mistura de grânulos de cortiça expandida, com granulometria e composição idênticas às incorporadas nas betonilhas, mas sem ligante. As curvas higroscópicas de adsorção revelaram que a mistura seca de ECG é menos higroscópica do que as betonilhas que integram ECG. No que se refere às argamassas, a que contém ECG revelou um comportamento higroscópico semelhante ao da betonilha com areia, enquanto as argamassas que integram agregados de argila expandida e grânulos de EPS revelaram um comportamento similar entre si, para a maioria dos ambientes húmidos estudados. Constatou-se que, no ambiente mais húmido, *i.e.* $HR=93.4\pm 2\%$, a argamassa com EPS adsorveu a maior quantidade de água, divergindo, assim, o seu comportamento higroscópico, relativamente às restantes argamassas cuja

capacidade de retenção de água se revelou gradualmente crescente, em todos os ambientes húmidos.

Os betões com agregados minerais evidenciaram-se mais higroscópicos do que os betões que também incorporam ECG. Verificou-se, ainda, que a quantidade de ECG presente na composição dos betões influencia o seu comportamento higroscópico, *i.e.* a higroscopicidade dos betões diminui à medida que se aumenta a quantidade de ECG na sua composição.

No domínio super-higroscópico, a argamassa com ECG apresentou a maior capacidade de retenção de água, enquanto a betonilha que incorpora apenas areia a menor. As argamassas com agregados de argila expandida e com grânulos de EPS revelaram um desempenho semelhante, em termos de retenção de água, no domínio capilar.

A incorporação de quantidades variáveis de ECG, designadamente 25, 30 e 40%, nos betões revelou que o betão que integra a maior quantidade de ECG é o que apresenta a maior capacidade de retenção de água, no domínio super-higroscópico.

Através dos ensaios de permeabilidade ao vapor de água, realizados segundo os métodos da tina húmida e da tina seca, constatou-se que a permeabilidade ao vapor de água dos materiais estudados foi maior no ensaio da tina húmida, em que se simulou um ambiente muito húmido ($HR=93.4\pm 2\%$). Verificou-se ainda que a quantidade de cimento presente na composição das betonilhas influencia a sua permeabilidade ao vapor de água. À medida que se aumenta a quantidade de cimento das betonilhas, diminui a sua permeabilidade ao vapor de água. Constatou-se que as betonilhas com ECG são mais permeáveis ao vapor de água do que as correspondentes betonilhas fabricadas apenas com areia.

A argamassa com ECG apresenta maior permeabilidade ao vapor de água do que a argamassa que apenas contém areia, tendo-se verificado uma diferença mais significativa, entre os valores dos coeficientes de permeabilidade ao vapor de água, no ensaio da tina seca. Constatou-se que as argamassas com agregados de argila expandida e com EPS apresentam maiores permeabilidades ao vapor de água do que a argamassa com ECG e a argamassa que contém areia.

Verificou-se igualmente que o betão estrutural leve com a maior quantidade de ECG apresenta as maiores permeabilidades ao vapor de água, enquanto o betão com a menor quantidade de ECG os valores mais reduzidos.

A absorção de água das betonilhas com ECG é maior do que a das correspondentes betonilhas de referência. A absorção de água aumenta à medida que se reduz a quantidade de cimento das betonilhas. Nos betões com ECG, verificou-se que a absorção de água aumenta com a quantidade de ECG na sua composição.

No prosseguimento do trabalho, caracterizou-se o desempenho acústico de dois sistemas de pavimentos que integram as betonilhas com ECG (M150, M250 e M400). Num dos sistemas, cada betonilha é aplicada sobre uma laje estrutural de betão, *i.e.* como revestimento aparente. No outro sistema de pavimento, cada betonilha é aplicada sobre uma laje estrutural de betão e sob uma lajeta de pequena espessura (lajeta flutuante). Os desempenhos dos sistemas de pavimento, em termos do isolamento sonoro a sons de percussão, foram avaliados em função da espessura das camadas de betonilha, *i.e.* 1.5, 3.0 e 4.5 cm. De modo a compreender a eficácia do isolamento sonoro aos sons de percussão das betonilhas com ECG, relativamente à cortiça na forma solta, designadamente no sistema de pavimento com lajeta flutuante, considerou-se, ainda, uma solução com uma camada (com as mesmas espessuras), sob a lajeta flutuante, da mistura de grânulos de cortiça expandida.

A avaliação do desempenho acústico dos sistemas de pavimentos compreendeu uma abordagem experimental, através da realização de ensaios laboratoriais, e uma abordagem numérica, através da aplicação de um modelo analítico, este último na previsão do isolamento sonoro a sons de percussão dos sistemas de pavimentos. Laboratorialmente, realizaram-se ensaios de percussão para quantificar o índice de redução da transmissão de sons de percussão. Com o objectivo de relacionar estes resultados com a rigidez dinâmica das betonilhas, também se realizaram ensaios para a determinação da rigidez dinâmica das mesmas. Os ensaios de rigidez dinâmica aparente foram realizados com o recurso a provetes de dimensões reduzidas, com as mesmas espessuras testadas nos ensaios de percussão.

A modelação numérica usada baseia-se na utilização de soluções analíticas desenvolvidas a partir de funções de Green para meios estratificados. O modelo analítico, que simula o comportamento dinâmico do sistema de transmissão do som, permitiu prever o isolamento sonoro a sons de percussão dos sistemas de pavimento, tendo-se concluído que, da sua utilização, resultam boas aproximações aos resultados obtidos por via experimental.

Os sistemas de pavimento com lajeta flutuante sobre as betonilhas com ECG revelaram-se menos eficazes na redução da transmissão de sons de percussão do que os sistemas de pavimento com as betonilhas no revestimento do piso.

Os ensaios de percussão realizados no sistema de pavimento, que integra a camada de betonilha no revestimento aparente, indicaram que o nível de redução sonora a sons de percussão (ΔL_w) do sistema diminui à medida que a quantidade de cimento das betonilhas aumenta. Neste sistema de pavimento, os melhores resultados obtiveram-se com M150 e M250 e com a espessura de 3.0 cm, para ambas as betonilhas. No mesmo sistema de pavimento, mas integrando M400, verificou-se similaridade entre os valores dos índices de redução de transmissão sonora, nas três espessuras estudadas. Quando as betonilhas são aplicadas no

revestimento do piso, os resultados de rigidez dinâmica revelaram-se concordantes com os de percussão.

Nos sistemas de pavimento com lajeta flutuante sobre as betonilhas com ECG, a variação do teor de cimento e a espessura das betonilhas parecem ter pouca influência na variação de ΔL_w . É provável que a elevada rigidez da lajeta flutuante seja determinante para a obtenção dos reduzidos valores de ΔL_w . No entanto, quando as betonilhas com ECG são substituídas por uma mistura de granulados soltos, ECG(3/5+5/10), o desempenho das soluções deste sistema de pavimento melhora significativamente.

Procedeu-se à avaliação do atraso térmico de vários sistemas estratificados de pavimentos que integram as betonilhas com ECG (M150, M250 e M400), em várias espessuras, e compararam-se com os dos correspondentes sistemas com as betonilhas de referência (R150, R250 e R400). Os sistemas de pavimento estudados são constituídos pela sobreposição de camadas de betão, betonilhas com ECG, betonilhas com agregados minerais (betonilhas de referência) e aglomerado de cortiça expandida. O atraso térmico foi determinado com o recurso a um modelo analítico que utiliza funções de Green para fontes harmónicas planas de calor colocadas em meio infinito.

A concretização da simulação do atraso térmico impõe o conhecimento da massa volúmica aparente, do coeficiente de condutibilidade térmica e do calor específico dos materiais que integram os sistemas de pavimento. A massa volúmica aparente e a condutibilidade térmica das betonilhas (leves e de referência) foram determinadas experimentalmente. A determinação do calor específico das betonilhas recorreu a um modelo analítico e baseou-se nas variações de temperatura através de um sistema multi-camada constituído por duas placas de EPS intercaladas por um provete da betonilha, quando o sistema é atravessado por um fluxo de calor unidireccional. As variações de temperatura através do referido sistema foram experimentalmente monitorizadas, tendo sido determinado o valor do calor específico, para cada betonilha, em função do melhor ajuste entre as curvas do modelo analítico e as curvas experimentais. As propriedades térmicas e a massa volúmica aparente dos restantes materiais foram consultadas na literatura da especialidade.

Foram estudados quatro sistemas de pavimentos constituídos por uma laje de betão armado e betonilha de espessura variável (Caso 1), uma laje de betão armado, betonilha de espessura variável e uma lajeta de betão armado (Caso 2), uma laje de betão armado e betonilha, ICB de espessura variável (Caso 3) e uma laje de betão armado, betonilha, ICB de espessura variável e uma lajeta de betão armado (Caso 4). A laje de betão armado possui 0.14 m de espessura.

Os resultados obtidos revelaram que o atraso térmico aumenta com o aumento da espessura dos materiais de isolamento aplicados, enquanto os coeficientes de transmissão térmica, U , diminuem. Verificou-se que o atraso térmico aumenta com o aumento do número de camadas dos sistemas de pavimento. Ao contrário do que seria expectável, as betonilhas com ECG não apresentam em todos os casos estudados, atrasos térmicos superiores aos das betonilhas de referência, nas mesmas aplicações e com as mesmas dosagens de cimento.

Nos casos em que apenas se aplica a betonilha (no revestimento aparente, Caso 1, ou sob a lajeta de betão, Caso 2), os menores valores de U correspondem às soluções que integram ICB e, tal como seria expectável, os sistemas com as betonilhas leves apresentam menores valores de U do que os correspondentes com as betonilhas de referência. Nos casos em que se integra ICB nos sistemas anteriores (betonilha com ICB no revestimento aparente, Caso 3, ou betonilha com ICB sob a lajeta de betão, Caso 4), não existe uma diferença significativa entre os valores de U das diversas soluções. No entanto, até à espessura de 75 mm de ICB, é notório que os sistemas de pavimento com as betonilhas leves apresentam menores valores de U do que os correspondentes sistemas que integram as betonilhas de referência.

7.2 PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido permitiu avaliar as vantagens da utilização de um desperdício industrial, os granulados de cortiça expandida (ECG), no fabrico de betonilhas de enchimento. O seu aproveitamento, para além de atribuir uma funcionalidade a um resíduo, permite também melhorar as propriedades higrotérmicas e acústicas de betonilhas, mantendo adequadas características mecânicas.

A caracterização mecânica realizada apenas contemplou a avaliação da resistência mecânica à compressão. No entanto, será importante complementar o estudo do desempenho mecânico das betonilhas com ECG, através da avaliação da sua resistência mecânica à flexão, à abrasão e ao impacto.

As propriedades higrotérmicas das betonilhas com ECG foram determinadas em regime permanente ($T=23^\circ$), podendo, em trabalhos futuros, alargar-se o estudo de caracterização considerando outros valores de temperatura e em regime não permanente.

No domínio do desenvolvimento dos métodos numéricos, a modelação conjunta dos fenómenos de transferência de humidade e de temperatura, em regime dinâmico, será de grande utilidade tanto na previsão de condensações nas interfaces entre as betonilhas e outros materiais

aplicados nos sistemas de pavimentos estratificados, como na simulação do comportamento dos materiais noutras gamas de variação de temperatura.

Ao nível do desenvolvimento de materiais de construção sustentáveis, poderão ser estudadas betonilhas com outras combinações de sub-produtos/resíduos, quer para a substituição parcial dos agregados convencionais (*e.g.* fibras de coco, desperdícios de etil vinil acetato [EVA] da indústria do calçado, palha de arroz, resíduos de borracha, fibras têxteis, etc.), quer para a substituição do ligante (*e.g.* resinas poliméricas provenientes de desperdícios industriais e de resíduos domésticos).