



Universidade de Aveiro

2022

**Adriana Margarida
Marques Figueira**

**Desenvolvimento de argamassas otimizadas para
sistemas de pavimentos radiantes**



Universidade de Aveiro

Ano 2022

**Adriana Margarida
Marques Figueira**

**Desenvolvimento de argamassas otimizadas para
sistemas de pavimentos radiantes**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob orientação científica do Professor Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, coorientação científica do Professor Doutor Romeu da Silva Vicente, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, e coorientação científica do Doutor Guilherme António dos Santos Calado Marianito da Ascensão, Investigador do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Este trabalho foi realizado ao abrigo do Projeto SEERFloor (Super Energy Efficient Radiant Floor Systems) com ref: PTDC/ECI-CON/3436/2020 financiado através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT). Contou também com o apoio dos projetos UIDB/04450/2020 e UIDP/04450/2020 - FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia; e CENTRO-01-0145-FEDER-022083 – Programa Operacional Regional do Centro Portugal (Centro 2020), no âmbito do Acordo de Parceria PORTUGAL 2020, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.

o júri

presidente

Professora Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues
professor auxiliar com agregação da Universidade de Aveiro

vogais

Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida
professor coordenador do Instituto Politécnico de Viseu - Escola Superior de Tecnologia

Professor Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira
professor catedrático da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Chegando ao fim desta etapa tão importante no meu desenvolvimento pessoal e profissional, e com a certeza que não caminhei sozinha nesta jornada, resta-me mostrar a minha gratidão a todos os que me acompanharam:

Aos meus orientadores, Professor Victor Ferreira, Professor Romeu Vicente e Investigador Guilherme Ascensão por toda a ajuda, motivação, partilha de conhecimentos e por toda a disponibilidade demonstrada durante todo este processo. Obrigada pela rigorosa orientação neste trabalho.

Ao Instituto Politécnico de Viseu e ao Projeto SEERFloor, pela possibilidade em realizar uma bolsa de investigação. Em especial, ao Professor Ricardo Almeida pela orientação, colaboração e completa disponibilidade na realização desta dissertação e investigação. E a toda a equipa do projeto pelo acompanhamento e incentivo, nomeadamente à Doutora Helena Paiva, ao Filipe Rebelo e ao Doutor António Figueiredo.

Pelo acolhimento e disponibilidade na componente laboratorial deste trabalho, ao departamento de Engenharia Civil, na pessoa da Eng.^a Maria Carlos Figueiredo e do técnico de laboratório Vítor Rodrigues; ao departamento de Geociências, na pessoa da Eng.^a Denise Terroso; ao departamento de Engenharia de Materiais, na pessoa da Eng.^a Célia Miranda; e ao Centro Tecnológico de Cerâmica e Vidro, na pessoa do Eng.^o Valente Almeida e Eng.^o Filipe Ferreira.

Às empresas *Saint-Gobain Portugal, S.A* e *Harsco Environmental - Siderurgia Nacional na Maia* (SN Maia – grupo MEGASA) pela cedência das matérias-primas.

A todos os professores do departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro com quem tive o privilégio de aprender e por toda a sabedoria partilhada.

Aos meus colegas de curso, Flávia Silva, Paulo Pinto e Ricardo Ascensão por todos os momentos vividos; à Inês Bourgeois e à Raquel Matos por todos os conselhos durante esta fase; e ao Rafael Anjos por ser o meu amigo e mais próximo companheiro nestes anos de estudo.

A toda a minha família, por todo o apoio que sempre me deram. Aos meus sobrinhos, Duarte e Leonor, por, mesmo não sabendo, me darem força e alegria todos os dias. E à minha irmã, por ser a melhor amiga e conselheira de todas as horas.

Ao Tiago que traçou estes anos de mestrado comigo e que me acompanhou sempre. Pelo carinho, amor e compreensão, pelo apoio em qualquer momento da vida e por tudo o que há-de vir.

Por fim, e o mais importante, aos meus pais, Lusmary e Carlos, que sem eles nada disto seria possível concretizar, por todas as oportunidades, apoio, compreensão e amor.

palavras-chave

Pavimento Radiante, Argamassas, Resíduo Siderúrgico, Material de Mudança de Fase, Construção.

resumo

As metas europeias para a eficiência energética e descarbonização do setor da construção e do ambiente construído exigem soluções de climatização mais eficientes e sustentáveis na conceção, seleção de materiais e eficiência dos sistemas. Um dos sistemas construtivos em que se pode intervir para melhorar a eficiência energética e conforto no parque edificado são os sistemas de pavimentos radiantes.

O presente estudo tem como principal objetivo desenvolver e caracterizar argamassas especialmente concebidas para pavimentos radiantes que contribuam para aumentar a eficiência deste sistema construtivo. A melhoria das propriedades térmicas das argamassas identifica-se como uma das estratégias promissoras para o aumento da eficiência térmica e energética destes sistemas que têm ganho quota de mercado. Tentou-se alcançar esta melhoria através da modificação da transmissão térmica da argamassa com a introdução de agregados densos e através da introdução de materiais de mudança de fase (PCM) para maximizar a capacidade de armazenamento e transmissão de calor.

Procurando promover modelos económicos circulares que contribuam para aumentar a sustentabilidade na construção, selecionou-se um resíduo siderúrgico denso, como substituto de agregados naturais na formulação de argamassas para pavimentos radiantes. A utilização deste agregado deu resultados promissores, tal como a posterior incorporação de dois materiais de mudança de fase nas formulações, que se efetuou para melhorar o desempenho térmico das argamassas sem degradar as suas propriedades nos estados fresco e endurecido. No entanto, o aumento do teor de agregado denso não se traduziu num aumento significativo de condutibilidade térmica possivelmente devido ao aumento da porosidade da matriz criada por dificuldades de empacotamento dos agregados. Com base nos resultados de caracterização das argamassas selecionadas, foi efetuado um estudo de simulação térmica por um modelo numérico, com o intuito de estimar o desempenho térmico das argamassas desenvolvidas quando aplicadas num sistema de pavimento radiante. Aferiu-se que a substituição de agregados de granulometria média por resíduo siderúrgico melhora o desempenho térmico do sistema de pavimento radiante, sem comprometer a trabalhabilidade e a resistência mecânica necessária nesta aplicação.

keywords

Radiant Floor, Mortar, Steel Waste, Phase Change Material, Construction.

abstract

The European targets for energy efficiency and decarbonization of the construction sector and the built environment require more efficient and sustainable climate solutions in the design, selection of materials and efficiency of systems. One of the systems which can intervene to improve energy efficiency and comfort in the building stock are radiant floor systems.

The main objective of the present study is to develop and characterize mortars specially design for radiant floors that contribute to increase the efficiency of this systems. The improvement of the thermal properties of the mortars is identified as one of the promising strategies to increase the thermal and energy efficiency of these systems that have been gaining market share. An attempt was made to achieve this improvement by modifying the thermal transmission of the mortar with the introduction of dense aggregates and through the introduction of phase change materials (PCM) to maximize heat storage and transmission capacity.

Seeking to promote a circular economic model that contribute to increasing sustainability in construction, a dense steel-making waste as a substitute for natural aggregates in the formulation of mortars for radiant floors. The use of this aggregate gave promising results, such as the subsequent incorporation of two-phase change materials in the formulations, which was made to improve the thermal performance of the mortars without degrading their properties in the fresh and hardened states. However, the increase of the aggregate content does not translate into a significant increase of thermal conductivity possibility due to increase matrix porosity created by the packaging difficulties. Based on the characterization results of the selected mortars, a thermal simulation study was carried out using a numerical model to estimate the thermal performance of the mortars develop when applied to a radiant floor system. It was found that the replacement of medium granulometry aggregates by steel waste improves the thermal performance of the underfloor heating system, without compromising the workability and mechanical resistance required in this application.

Índice

1. Introdução.....	3
1.1. Enquadramento e relevância do tema	3
1.2. Objetivos	3
1.3. Estruturação da dissertação.....	5
2. Pavimentos radiantes.....	9
2.1. Sistemas radiantes elétricos	12
2.2. Sistemas radiantes hidráulicos	13
3. Estratégias de melhoria do desempenho dos sistemas de pavimento radiante.....	17
3.1. Desempenho operacional do sistema.....	17
3.1.1. Impacto da composição do sistema, configuração e materiais.....	17
3.1.2. Impacto das condições de funcionamento do sistema.....	18
3.1.3. Impacto da incorporação de Materiais de Mudança de Fase.....	19
3.2. Funcionalização da camada de argamassa dos pavimentos radiantes	21
3.2.1. Valorização de resíduos.....	21
3.2.2. Utilização de Materiais de Mudança de Fase	25
4. Metodologia experimental.....	31
4.1. Formulação de argamassas para sistemas de pavimento radiante	32
4.1.1. Caracterização dos materiais constituintes das argamassas	32
4.1.2. Desenvolvimento e caracterização de argamassas	40
4.1.2.1. Caracterização das formulações em estado fresco	44
4.1.2.2. Caracterização das formulações em estado endurecido	45
4.2. Simulação numérica de sistemas de pavimento radiante.....	48
5. Estudo de argamassas para sistemas de pavimento radiante.....	53
5.1. Desenvolvimento e caraterização de argamassas	53
5.1.1. Argamassa de referência.....	53

5.1.2.	Efeito da introdução de agregado denso nas argamassas	56
5.1.2.1.	Análise do efeito do ASIC	56
5.1.2.2.	Efeito da adição de água e adjuvantes.....	63
5.1.2.3.	Avaliação da condutibilidade térmica	66
5.1.3.	Efeito do material de mudança de fase nas argamassas	68
5.2.	Simulação numérica de sistemas de pavimento radiante com argamassas otimizadas	72
6.	Conclusões	79
7.	Referências bibliográficas	85

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Curvas de distribuição de temperatura. Adaptado: [11]	9
Figura 2.2 - Pavimento radiante em construção húmida. Adaptado: [15].....	11
Figura 2.3 - Pavimento radiante em construção seca. Adaptado: [16].....	11
Figura 2.4 - Sistema radiante elétrico. Reproduzido: [18].	12
Figura 2.5 - Sistema radiante hidráulico. Reproduzido: [22].	13
Figura 3.1 – Comportamento do PCM. Adaptado: [2].....	19
Figura 3.2 – Esquema pavimento radiante de camada dupla aprimorado. Adaptado: [31]	20
Figura 4.1 - Agregados: a) Areia S50; b) Eco-chorreio; c) Calcário 1.5-3.0	33
Figura 4.2 - Separação do ASIC em 3 frações iniciais distintas: a) superior a 16mm; b) entre 4 e 16 mm; c) inferior a 4mm	34
Figura 4.3 – a) Moinho de mandíbulas b) Moinho de martelos	34
Figura 4.4 - Material retido nos diferentes peneiros, em cada um dos agregados: a) Areia S50; b) Areia Eco-Chorreio; c) Calcário 1.5-3.0; d) ASIC	35
Figura 4.5 - Curvas granulométricas dos agregados.....	36
Figura 4.6 - Massa volúmica real, baridade e volume de vazios dos agregados.....	38
Figura 4.7 - Imagens SEM com ampliação de $\times 400$: a) PCM Micronal® DS 5001 X; b) PCM CrodaTherm™ ME 29P. Reproduzido de [46].....	39
Figura 4.8 - Curvas granulométricas dos agregados e das formulações.....	43
Figura 4.9 - Massa volúmica real, baridade e volume de vazios das misturas.....	44
Figura 4.10 - Perfil da temperatura da água	50
Figura 4.11 – Esquema do pavimento radiante simulado: (a) Modelo tridimensional; (b) Secção transversal (dimensões em metros) - Adaptado: [41]	50
Figura 5.1 - Dados para diferentes teores de água e adjuvantes na argamassa de referência de: a) consistência por espalhamento; b) densidade aparente em estado fresco (os pontos 11% W; 0.08% EC e 13% W; 0.08% EC para 1.5% de superplastificante estão sobrepostos no valor 2130 kg/m^3)	55
Figura 5.2 - Consistência por espalhamento e densidade em estado fresco em formulações com diferentes teores de ASIC	57
Figura 5.3 - Relação entre densidade aparente e módulo de elasticidade dinâmico das formulações, em função do teor de ASIC	58

Figura 5.4 - Resistência mecânica à flexão e à compressão das argamassas	59
Figura 5.5 - Absorção de água e coeficiente de capilaridade das argamassas, em função do teor de ASIC	60
Figura 5.6 - Consistência por espalhamento das argamassas com adição de água e adjuvantes	64
Figura 5.7 – Densidade em estado endurecido das argamassas com adição de água e adjuvantes	64
Figura 5.8 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com adição de água e adjuvantes	65
Figura 5.9 – Resistência mecânica das argamassas com adição de água e adjuvantes: a) Resistência mecânica à flexão; b) Resistência mecânica à compressão	66
Figura 5.10 - Condutibilidade térmica das argamassas	67
Figura 5.11 – Densidade no estado endurecido das argamassas com incorporação de ASIC e PCM.....	70
Figura 5.12 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com incorporação de ASIC e PCM.....	70
Figura 5.13 – Resistência mecânica das argamassas com incorporação de ASIC e PCM: a) Resistência mecânica à flexão; b) Resistência mecânica à compressão.....	71
Figura 5.14 - Perfil da temperatura média em função da distância à tubagem, em 6 horas de funcionamento do sistema	73
Figura 5.15 - Perfil da temperatura à superfície do pavimento para diferentes camadas de enchimento	74
Figura 5.16 - Distribuição da temperatura no sistema de pavimento radiante simulado com argamassa de referência: (a) Modelo tridimensional; (b) Distribuição da temperatura à superfície	76
Figura 5.17 - Distribuição da temperatura no sistema de pavimento radiante simulado com argamassa A35ASIC_13W: (a) Modelo tridimensional; (b) Distribuição da temperatura à superfície.....	76
Figura 5.18 - Distribuição da temperatura no sistema de pavimento radiante simulado com argamassa A50ASIC_13W: (a) Modelo tridimensional; (b) Distribuição da temperatura à superfície.....	76

Índice de Quadros

Quadro 4.1- Dados dos materiais de mudança de fase.....	39
Quadro 4.2 - Formulação da argamassa de referência.....	40
Quadro 4.3 - Argamassas com incorporação de ASIC.....	41
Quadro 4.4 Teores de materiais sólidos nas diferentes formulações.....	42
Quadro 4.5 - Propriedades dos materiais utilizados no modelo de simulação	50
Quadro 5.1 - Características da argamassa de referência (AR).....	53
Quadro 5.2 - Teores de água e adjuvantes favoráveis à otimização das formulações....	56
Quadro 5.3 - Consistência por espalhamento e densidade em estado fresco das formulações AR, A35ASIC e A50ASIC	61
Quadro 5.4 - Propriedades em estado endurecido das formulações AR, A35ASIC e A50ASIC	62
Quadro 5.5 - Formulações selecionadas para ensaio da condutividade térmica	66
Quadro 5.6 - Formulações com ASIC e PCM simultaneamente.....	68
Quadro 5.7 - Espalhamento e densidade aparente no estado fresco das argamassas com incorporação de ASIC e PCM.....	69

Acrónimos

ALC	–	<i>Autoclaved Lightweight Concrete</i> (Betão Leve Autoclavado)
ASIC	–	Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção
EC	–	Éter de celulose
Fe-Cr	–	Ferro-crómio
GGBS	–	<i>Ground Granulated Blast Furnace Slag</i> (Escória de Alto Forno Granulada)
PCM	–	<i>Phase Change Material</i> (Material de Mudança de Fase)
PEAD	–	Polietileno de Alta Densidade
PE-RT	–	Polietileno Reticulado
PMMA	–	Polimetilmetacrilato
PS	–	Poliestireno
SEM	–	<i>Scanning Electron Microscope</i> (Microscopia Eletrónica de Varrimento)
SP	–	Superplastificante

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

1.1. Enquadramento e relevância do tema

O consumo de energia elétrica usada para controlo de temperatura em edifícios tem vindo a aumentar drasticamente. Para o minimizar é essencial intensificar a investigação sobre estratégias de aquecimento e arrefecimento passivos, bem como o desenvolvimento de novos materiais e soluções de construção com menor impacto ambiental [1, 2].

Neste contexto, com a prioridade centrada na evolução para edifícios com maior eficiência energética, ou seja, com o objetivo final de diminuir o consumo de energia e, consequentemente, diminuir também a emissão de poluentes referentes ao consumo de combustíveis fósseis e energias não renováveis, surge a necessidade de procurar novas formas de aquecimento e arrefecimento mais eficientes e associado à capacidade de armazenar energia durante o período de vazio e libertá-la durante o período de pico.

Os sistemas de aquecimento e arrefecimento por pavimento radiante constituem uma resposta a este desafio e têm vindo a ser cada vez mais utilizados em edifícios, dado que se apresentam como uma solução de climatização mais eficiente em termos de economia de energia em setores comerciais e residenciais. Além disto, têm como principal vantagem a distribuição uniforme da temperatura ambiente [3, 4]. Estas vantagens não melhoram apenas o conforto térmico interno, mas também oferecem a oportunidade de aplicar recursos de elevada eficiência energética, como o aproveitamento solar, uma vez que, quando instalados em conjunto com os sistemas de pavimento radiante, é possível economizar cerca de 60% de energia [5].

Assim, tendo em conta estes aspetos, e focando na intervenção dos mesmos, a presente dissertação seguirá os objetivos de seguida descritos.

1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento e caracterização de argamassas melhoradas com aplicação de resíduos siderúrgicos, de modo a manipular a densidade dos materiais, afetando a sua condutibilidade térmica e, posteriormente, ajustar a incorporação de materiais de mudança de fase em modo microencapsulado para melhorar

a função de armazenamento energético. Pretende-se também, no final, efetuar a avaliação por simulação do desempenho térmico das melhores argamassas desenvolvidas, quando aplicadas a um sistema de pavimento radiante, recorrendo a um modelo numérico calibrado.

O conceito de sustentabilidade e de economia circular passa nomeadamente pela incorporação de resíduos em materiais como matérias primas alternativas às naturais, estando esta estratégia a tornar-se cada vez mais relevante no setor da construção por se apresentar também como um forte impacto na atividade económica [6]. Assim, é necessário intensificar a gestão dos resíduos de forma a utilizá-los como matérias-primas alternativas em novos materiais, dando um novo ciclo de vida tanto a resíduos industriais como a subprodutos, tornando possível alcançar um maior grau de sustentabilidade e eficiência no uso de recursos. Já os materiais de mudança de fase (PCM's – *Phase Change Materials*) são conhecidos como uma das formas eficazes para se alcançar maiores condições de conforto no interior dos edifícios, através da sua capacidade de absorver calor latente e libertá-lo posteriormente quando é necessário [7, 8, 9].

Resumindo, o principal objetivo deste trabalho é aumentar o desempenho energético dos pavimentos radiantes pela utilização de uma argamassa melhorada, de modo a garantir o conforto de espaços interiores sem assimetria térmica e com maior desempenho energético. Desta forma, surge a necessidade e importância de, neste trabalho, se estudar duas abordagens numa componente laboratorial e, posteriormente, uma abordagem em componente numérica.

Em relação à componente laboratorial, por um lado, de modo a aumentar o nível de sustentabilidade e o grau de transmissão térmica nos sistemas de pavimento radiante, serão desenvolvidas e caracterizadas argamassas com incorporação de resíduos enquanto agregados mais densos. Por outro lado, ainda no desenvolvimento de argamassas e sua caracterização, o foco é o aumento da capacidade de armazenamento energético e consequente transmissão térmica trazida pela incorporação de materiais de mudança de fase (PCM). Por fim, em relação à componente numérica, o principal objetivo é avaliar a transmissão térmica das argamassas desenvolvidas na anterior fase, para avaliação e comprovação da eficiência dos pavimentos radiantes hidráulicos, cuja camada de enchimento seja realizada com argamassas melhoradas e com menor impacto ambiental.

1.3. Estruturação da dissertação

A presente dissertação está estruturada em 7 capítulos. No capítulo 1 é indicado o tema da dissertação, mais especificamente, o enquadramento e relevância do tema e objetivos propostos.

No capítulo 2 são abordados os tipos de sistemas de pavimento radiante existentes, descrito o funcionamento destes e a sua aplicação em diferentes tipologias construtivas, de construção húmida ou seca.

De seguida, o capítulo 3 apresenta o estado de arte acerca das melhorias no desempenho do sistema de pavimento radiante. Aprofunda também o conhecimento através dos estudos já realizados, numa primeira fase, sobre o desempenho operacional do sistema, e posteriormente, sobre os aspetos mais relacionados com o desempenho dos materiais e sistemas, focando na funcionalização da camada de enchimento dos sistemas, ambos com o intuito de saber o que é necessário para obter um sistema de pavimento radiante mais eficiente.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia aplicada no presente trabalho. Primeiramente, focando na formulação e caracterização das argamassas, onde é descrita a caracterização dos materiais utilizados, bem como a descrição das formulações efetuadas e suas caracterizações. Segue-se a etapa da simulação numérica, onde se descreve o plano realizado para obtenção da avaliação do desempenho térmico das argamassas desenvolvidas.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos no plano experimental e de simulação numérica.

O capítulo 6 apresenta as conclusões sobre os resultados discutidos anteriormente, incluindo sugestões de trabalhos futuros a desenvolver para completar o estudo desenvolvido.

Por fim, no capítulo 7 estão listadas as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento da presente dissertação.

Capítulo 2

Pavimentos radiantes

2. Pavimentos radiantes

Os sistemas de pavimento radiante baseiam-se na aplicação de tubagens, elétrica ou hidráulica, em laje de betão ou colocados sob o revestimento do pavimento, com o fim de aquecer ou arrefecer o piso [4]. O pavimento radiante elétrico aquece através de cabos elétricos colocados sob o piso para gerar calor, enquanto os sistemas hidráulicos conduzem a água através de tubos, sendo esta diferença abordada nas secções seguintes.

Os sistemas radiantes sofreram um rápido desenvolvimento graças à sua eficiência em assegurar uma distribuição de temperatura ideal. Esta distribuição é conhecida pela curva ideal de conforto térmico, segundo a qual as zonas mais próximas do pavimento estão ligeiramente mais quentes que as mais próximas do teto [10].

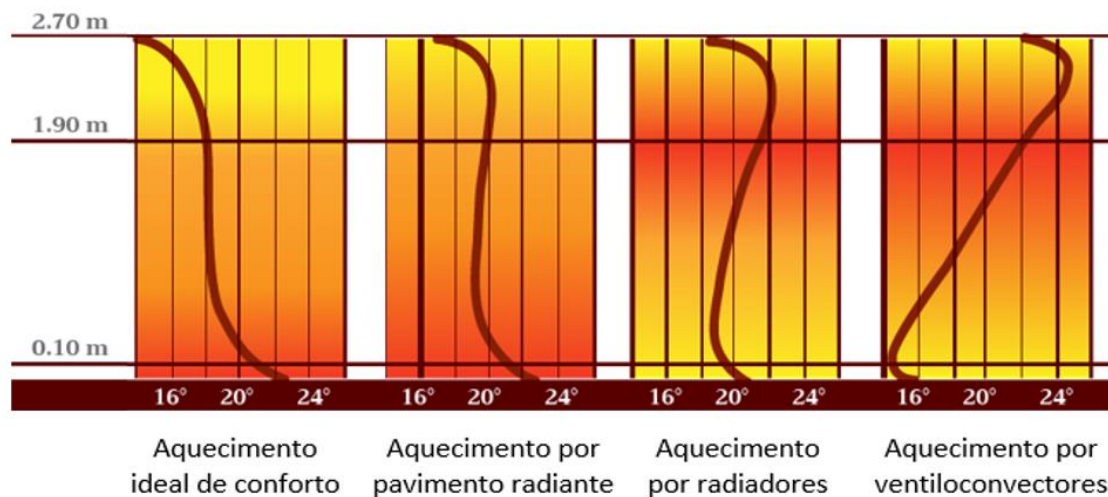


Figura 2.1 - Curvas de distribuição de temperatura. Adaptado: [11]

Na Figura 2.1 são apresentadas as curvas de distribuição da temperatura, em função da altura do espaço circundante, do aquecimento ideal de conforto para vários sistemas de aquecimento existentes. A curva que representa o aquecimento proveniente dos pavimentos radiantes é aquela que mais se assemelha a uma curva ideal de conforto, uma vez que existe uma maior proximidade na distribuição de calor entre o pavimento radiante e a solução ideal, ou seja, a temperatura do ar é superior nas zonas mais próximas ao pavimento, e há uma redução gradual de temperatura até à zona mais alta. Já em relação ao sistema de aquecimento por radiadores e por ventiloconvectores, o que acontece é o

contrário do ideal, ou seja, as temperaturas mais altas são registadas na zona mais próxima ao teto e as mais baixas na zona inferior do compartimento.

Isto acontece pois o sistema de pavimento radiante utiliza as superfícies circundantes como fonte de calor, no qual a transferência de calor radiante cobre mais de 50% da troca de calor dentro de um espaço, sendo a restante energia transferida por convecção [12, 13]. O calor gerado em vez de aquecer o ar e ser distribuído por toda a casa, aquece os objetos e as pessoas por radiação, permitindo que a temperatura do ar seja mais baixa e, consequentemente, seja necessária menos energia para transferir calor diretamente para os utentes do espaço, mantendo as condições de conforto [4, 12].

Os pavimentos radiantes, em comparação com os sistemas de aquecimento e arrefecimento que operam apenas por convecção são, em primeiro lugar, mais vantajosos na economia do espaço que ocupam. Em segundo lugar, são sistemas de maior eficiência energética, uma vez que não dependem apenas da transferência de calor por convecção e, consequentemente, menos energia é consumida. Além disto, como os sistemas de pavimento radiante utilizam, geralmente, a água como meio térmico, que tem uma capacidade térmica mais elevada do que o ar, a energia de bombeamento é relativamente baixa e, consequentemente, é necessária menor energia para aquecimento ou arrefecimento do ambiente. Em terceiro lugar, os sistemas de radiação são mais adequados para utilizar a massa térmica do edifício, que pode não apenas reduzir o consumo de energia no horário de pico, mas também atenuar muitas flutuações da temperatura do ar ambiente [12]. Por fim, são sistemas com maior conforto acústico e térmico, dado que os sistemas de convecção geram frequentemente ruídos no funcionamento do sistema, bem como desconforto térmico devido a correntes de ar frio, que são praticamente inexistentes nos sistemas cuja transferência de calor se realiza, maioritariamente, por radiação. E, por outro lado, o sistema de arrefecimento radiante exige um menor gradiente de temperatura vertical, menos movimentos de ar e, portanto, redução do desconforto local para os ocupantes.

Os sistemas de aquecimento por pavimento radiante podem ser distinguidos em tipologia de construção húmida ou seca. O primeiro tipo de construção incorpora as tubagens, embebendo-as na argamassa ou betonilha superior. Já a tipologia de construção seca integra, por encaixe, a tubagem sob o pavimento, sem a argamassa ou a betonilha. Posto isto, os sistemas secos são mais fáceis de instalar, no entanto, podem gerar maior

desperdício, se apresentarem perdas de calor no espaço entre a tubagem e o revestimento do pavimento [14].

No método de construção húmida, a estrutura do pavimento, como representado na Figura 2.2, é composta por uma laje de betão, seguida de uma camada de isolamento, Betão Leve Autoclavado (ALC) e uma argamassa de acabamento, onde se insere a tubagem de água quente. Nesta estrutura, o ALC evita as perdas de calor da camada superior. Já a argamassa armazena e liberta a energia térmica da tubagem de água quente. No entanto, como é a única camada com esta característica, o desempenho deste sistema em termos de armazenamento de calor é muito baixo. Ou seja, se o fornecimento de água for interrompido, a temperatura superficial diminui drasticamente [15].

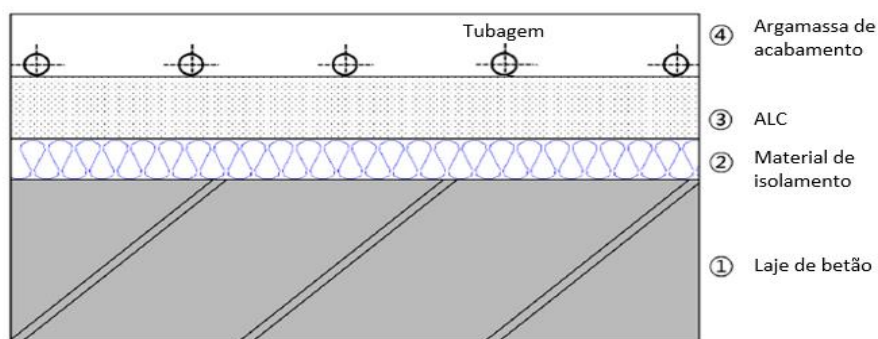


Figura 2.2 - Pavimento radiante em construção húmida. Adaptado: [15]



Figura 2.3 - Pavimento radiante em construção seca. Adaptado: [16]

O método de construção seca é mais leve que o anterior, uma vez que não contém a camada de argamassa. No entanto, por essa razão, este método acaba por não armazenar a energia térmica tão eficazmente. A Figura 2.3 mostra a configuração típica deste método de construção.

2.1. Sistemas radiantes elétricos

Os pavimentos radiantes elétricos utilizam tubos de aquecimento elétricos embutidos no piso, como se observa na Figura 2.4, aquecendo o pavimento e proporcionando o aquecimento do ambiente de uma forma homogênea [17].

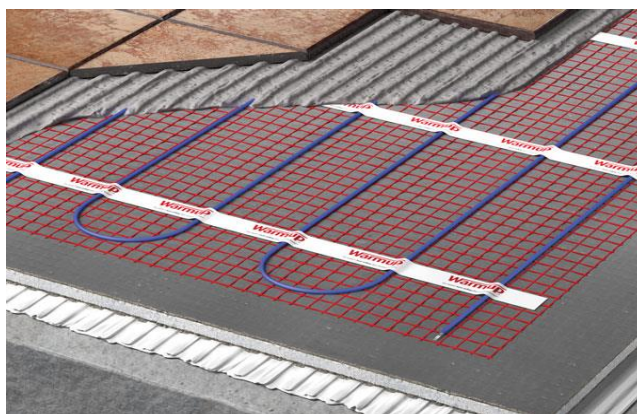


Figura 2.4 - Sistema radiante elétrico. Reproduzido: [18].

Nos tubos colocados sob o pavimento são instaladas resistências elétricas em forma de serpentina, no piso são colocadas sondas e instalados termostatos. Estes três elementos permitem regular a temperatura desejada, uma vez que, pela comparação entre a temperatura da sonda do pavimento e a temperatura de referência do termostato, é possível ajustar a potência necessária [19].

Uma das principais características deste tipo de sistema é que as tubagens são pré-espaçadas, permitindo por isso uma saída de calor uniforme. No entanto, este espaçamento pode ser alterado conforme a potência desejada para cada aplicação. Além disto, é considerado como um sistema eficiente uma vez que necessita de menos energia para o seu funcionamento, quando comparado com os sistemas de aquecimento tradicionais [20].

Apesar destes sistemas serem controlados por termostatos, são propícios a perdas de calor e a sua eficácia depende de fatores como o isolamento térmico, a condutibilidade térmica dos materiais colocados sobre a tubagem e o custo da eletricidade [21].

2.2. Sistemas radiantes hidráulicos

Um sistema de aquecimento radiante hidráulico inclui uma série de tubos onde circula a água e localizados sob o revestimento do pavimento (Figura 2.5) [4]. Neste sistema, a água que circula nos tubos é aquecida por qualquer fonte de calor, desde uma caldeira padrão até às novas tecnologias de fontes renováveis, mais sustentáveis, como a energia solar térmica ou as bombas de calor [22].

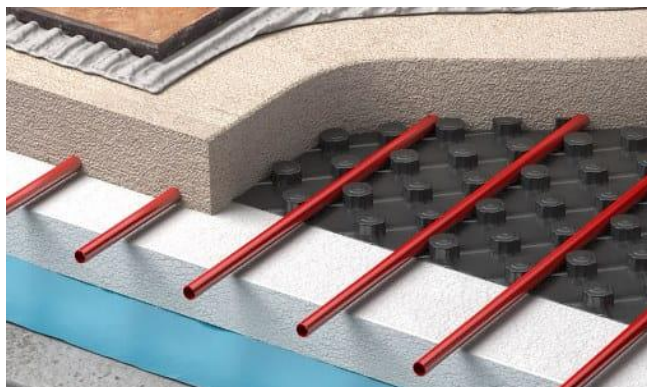


Figura 2.5 - Sistema radiante hidráulico. Reproduzido: [22].

Independentemente de algumas diferenças construtivas entre várias soluções comerciais, um sistema de pavimento radiante hidráulico envolve elementos como o sistema de fornecimento de água quente (caldeiras, bombas de calor, sistemas solares, entre outros), sistema de bombagem e controlo de distribuição de água entre o sistema de fornecimento de água e a tubagem, isolamento térmico para minimizar as perdas de calor, tubagem de água localizada sob os pavimentos, argamassa (ou betonilha) com características de transferência de calor e, por fim, um revestimento do pavimento que não impeça as trocas de calor [23].

Os pavimentos hidráulicos têm a vantagem de poder arrefecer o ambiente. Neste caso o que acontece é que o sistema acaba por inverter os fluxos de calor associados ao aquecimento radiante. Isto é, os pavimentos radiantes de aquecimento irradiam o calor para o ambiente sobre eles, enquanto os de arrefecimento retiram calor ao ambiente, uma vez que o pavimento está, constantemente, a ser arrefecido por via de água fria, armazenando o calor existente no interior do edifício [24].

Capítulo 3

Estratégias de melhoria do desempenho dos sistemas de pavimento radiante

3. Estratégias de melhoria do desempenho dos sistemas de pavimento radiante

3.1. Desempenho operacional do sistema

Em termos de desempenho operacional do sistema, pretende-se aqui evidenciar alguns estudos que têm vindo a ser realizados ao nível dos constituintes dos pavimentos radiantes, focando-se no funcionamento dos mesmos e potenciais medidas de melhoria, que se podem imprimir ao nível da constituição do sistema (i.e., materiais, espessura das camadas) e do ponto de vista operacional (i.e., temperatura e caudal da água, controlo preditivo). A este respeito, tem havido progressos no entendimento da influência do diâmetro, espaçamento e quantidade de tubagem, bem como nos tipos e espessuras das camadas de isolamento e revestimentos. Ao mesmo tempo, tem havido avanços na perceção das temperaturas operativas ideais da água, bem como na fonte energética ideal para melhorar o desempenho do sistema. Por último, tem vindo a ser cada vez mais crucial perceber o papel e o efeito dos materiais de mudança de fase (PCM) e a sua localização preferencial com o intuito de alcançar a maior eficiência energética possível do sistema.

3.1.1. Impacto da composição do sistema, configuração e materiais

Após realizar a análise da influência dos parâmetros de projeto no desempenho de um pavimento radiante, Sattari & Farhanieh, (2005) concluíram que, em primeiro lugar, o tipo e o diâmetro da tubagem têm efeitos mínimos no desempenho térmico do sistema. Em segundo lugar, concluíram que os parâmetros de projeto mais cruciais ao bom desempenho do sistema são o tipo e a espessura do revestimento. Demonstraram também que a radiação é o mecanismo dominante de transferência de calor [4]. Assim, para estes autores, e do ponto de vista do projeto, um pavimento radiante ideal inclui o número mínimo de tubos necessários para fornecer um fluxo específico de água quente e é constituído por um revestimento cujo material tenha uma boa condutibilidade térmica.

O revestimento que melhor se adapta às condições requeridas nestes sistemas, na visão de Zhao et al., (2012) é um pavimento de madeira, uma vez que é o que, segundo o estudo elaborado, apresenta uma temperatura superficial mais moderada e uniforme [25]. No entanto, Pinto, (2020) chegou à conclusão que a madeira, o MDF e a cerâmica apresentar

comportamentos semelhantes. No entanto, a cerâmica é o material que se mostra ser o mais resistente às variações de temperatura ambiente, uma vez que devido à sua espessura e densidade serem superiores, é o material que apresenta maior inércia térmica [26].

Focando na influência de cada material do pavimento na transferência de calor, a capacidade de aquecimento diminui com o aumento do espaçamento dos tubos. Ao mesmo tempo, quando se aumenta a condutibilidade térmica da tubagem, o fluxo de calor também aumenta ligeiramente. No entanto, quando a condutibilidade térmica da tubagem é cerca de duas vezes maior do que a condutibilidade térmica do material de enchimento, a influência deste parâmetro pode ser desprezível. Para além disto, o aumento do coeficiente de transferência de calor total entre a superfície do pavimento e o ambiente da divisão pode também melhorar a capacidade de aquecimento e o efeito resultante é afetado pela resistência térmica do material da superfície [27].

3.1.2. Impacto das condições de funcionamento do sistema

Ji et al., (2010) propôs um modelo onde, entre várias análises, aferiu que a velocidade da água na tubagem de pavimento hidráulico não é significativa no desempenho do sistema, pelo que esta pode ser ajustada para um caudal menor, contribuindo para economizar a energia da bomba [28].

Com o propósito de determinar as temperaturas de abastecimento de água quente necessárias para manter as temperaturas da superfície do pavimento e do ar interno no ponto de ajuste num pavimento radiante baseado no método de construção húmida, Baek & Kim, (2018) realizaram um estudo onde foi possível entender que a temperatura ideal para o fim a que se propõe, encontra-se na ordem dos 40-41°C, com temperaturas de retorno de 27.5°C, levando a que a temperatura do ar interno atingisse valores entre os 18.7 e 22.6°C, durante as horas de aquecimento [29].

Já em relação à fonte energética para operação do sistema, Plytaria et al., (2018) avaliaram energeticamente um edifício com pavimento radiante alimentado por uma bomba de calor assistida por energia solar, mais concretamente, com três tipos de coletores solares (painel solar térmico, painel fotovoltaico e painel térmico fotovoltaico). Perante estas alternativas, os investigadores perceberam que, em primeiro lugar, a fim de obter uma cobertura solar satisfatória para a bomba de calor, a área de coleta do campo solar deveria

ser da ordem dos 20 m². Ao utilizar sistemas acionados por energia solar, o consumo de eletricidade poderia ser reduzido de 42% a 67%, sendo o sistema com painel fotovoltaico o que consumia menos eletricidade. Por fim, o período de recuperação dos sistemas podia variar significativamente, entre 9,6 anos para o sistema com coletores de painel solar com PCM e os 22 anos para o sistema com painel solar sem PCM [30].

3.1.3. Impacto da incorporação de Materiais de Mudança de Fase

Os materiais de mudança de fase (*Phase Change Materials* – PCM) são materiais de armazenamento de calor latente de alto desempenho, que absorvem e libertam calor ao mudar de estado físico. Na Figura 3.1 é representado o comportamento típico do PCM, que, inicialmente se encontra no estado sólido e quando a temperatura de mudança de fase é atingida, a temperatura do PCM mantém-se constante e o calor armazenado aumenta até mudar para a fase líquida, na qual se torna capaz de libertar essa energia. De notar ainda que a descarga de calor latente e sensível aumenta com a capacidade do PCM.

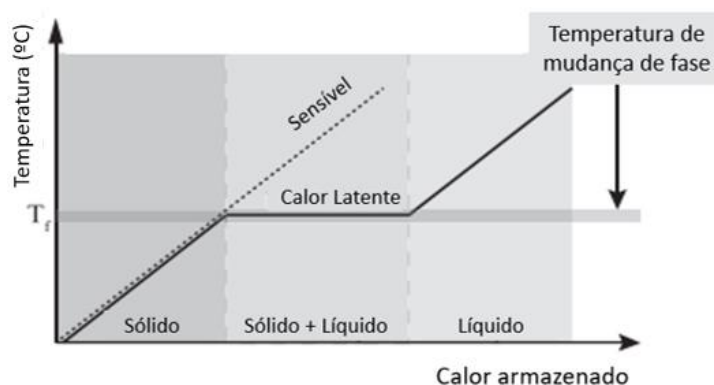


Figura 3.1 – Comportamento do PCM. Adaptado: [2]

Os PCM's podem ser incorporados em pavimentos radiantes com o fim de os tornar energeticamente mais sustentáveis. Graças à grande quantidade de calor latente armazenado, é possível garantir que a temperatura superficial dos pavimentos radiantes se mantenha constante e que o tempo de diminuição da temperatura superficial seja mais gradual. Além disto, o consumo de energia de aquecimento pode ser reduzido, sendo possível operar o sistema de forma intermitente [15].

3. Estratégias de melhoria do desempenho dos sistemas de pavimento radiante

Posto isto, Baek & Kim (2019) analisaram o desempenho térmico e o potencial de economia de energia do sistema de aquecimento por pavimento radiante com e sem incorporação de PCM macroencapsulado em placas, localizado entre duas camadas de argamassa sob a tubagem, baseado no método de construção húmida e água quente. Verificando-se que, de facto, a incorporação de PCM reduz o consumo de energia, sendo a espessura das placas com PCM proporcional à energia poupada, uma vez que o sistema com PCM em placas de 10 mm de espessura reduziu o consumo de energia em cerca de 2.4%. Já quando foi aumentada a espessura das placas com PCM para 20 ou 50 mm, o rácio anual de poupança de energia aumentou de 7.3% ou 15.3%, respetivamente [15].

Outro enfoque no modo operacional do sistema que tem vindo a ser cada vez mais aprimorada e analisada, é o sistema de pavimento radiante de camada dupla. Neste sistema, apresentado por Xia e Zhang, (2016), como os materiais têm diferentes temperaturas de fusão, o objetivo passou por deslocar a carga do período de pico, ou seja, entre as 8h00 e as 23h00, para o período fora de pico, das 23h00 às 8h00. O conceito foi utilizar o material de mudança de fase para armazenar energia fora do período de pico, por meio de uma bomba de calor ou de refrigeração e, posteriormente, libertá-la neste período mais crítico, conforme as necessidades de aquecimento ou arrefecimento. A estrutura do sistema está representado na Figura 3.2, onde existem duas tubagens, uma das quais está inserida na camada de PCM de arrefecimento, onde circula a água fria, e a outra, na camada de PCM de aquecimento com destino à circulação da água quente [31].

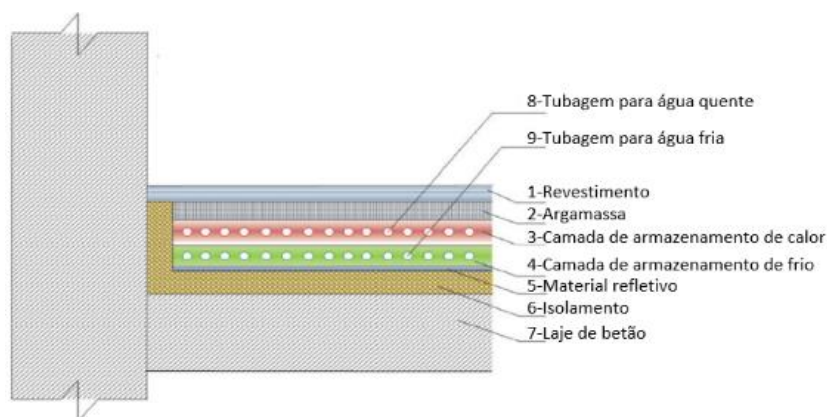


Figura 3.2 – Esquema pavimento radiante de camada dupla aprimorado. Adaptado: [31]

Este sistema inovador além de contribuir para um custo geral do sistema mais reduzido, por cada tubagem estar envolvida pelo material de mudança de fase com pontos de fusão

distintos, a resistência de transferência de calor do sistema é também mais reduzida, melhorando a eficiência de transferência de energia.

Com a alternância das camadas de armazenamento de energia, como o aumento de temperatura no PCM acontece no processo de armazenamento térmico, o consumo de energia do sistema é reduzido durante este processo. Além disto, nas mesmas condições, verificou-se que o pavimento cuja camada de aquecimento se encontra sobre a de arrefecimento, contribui para uma temperatura do ar mais elevada, bem como uma mudança de temperatura no ar maior do que no outro pavimento.

3.2. Funcionalização da camada de argamassa dos pavimentos radiantes

Em termos dos desempenhos dos materiais e sistemas, este trabalho pretende focar nas melhorias que se conseguem ao nível dos materiais com a introdução de aditivos específicos, como, por exemplo, incorporando agregados mais densos e condutores e ainda materiais de mudança de fase (PCM). Ao nível destes componentes, tem havido avanços na incorporação de resíduos em argamassas e betonilhas que podem ser úteis transpor para o desenvolvimento das formulações destes materiais em sistemas de pavimento radiante, valorizando simultaneamente uma aproximação pela economia circular e a um maior grau de sustentabilidade.

3.2.1. Valorização de resíduos

Em termos da valorização de resíduos na incorporação destes em argamassas e betonilhas, esta pode ser realizada de duas formas distintas, ou seja, pela substituição parcial do ligante ou em substituição parcial e/ou total dos agregados nas formulações destes materiais.

Dessa forma, pretende-se evidenciar aqui estudos recentes que têm sido essenciais na intensificação da investigação nesta área. Focando na substituição de ligante por agregados siderúrgicos, Her Yung Wang et al. (2021), estudaram a influência que a utilização de escória granulada moída do alto forno (GGBFS) e a escória reduzida de aço inoxidável (SSRS) como substitutas parciais do cimento teria nas propriedades físicas

como na resistência à flexão, à compressão e no módulo de elasticidade dinâmico. Para isso, foram realizados corpos de prova com diferentes teores de cada constituinte, que foram posteriormente curados e testados aos 3, 7, 28, 56 e 91 dias. Foi perceptível que a consistência por espalhamento aumentou com o aumento do teor de SSRS e de GGBFS, sendo mais relevante quando se incorpora GGBFS. Já em relação à resistência mecânica à compressão e à flexão, além de esta aumentar com o tempo de cura, também se concluiu que um aumento do teor de SSRS provoca a diminuição de resistência mecânica, no entanto, um aumento do teor de GGBFS levou a um aumento considerável na resistência mecânica. Por fim, relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico também aumentou com o tempo de cura e, como no caso da resistência, diminuiu com o aumento do teor de SSRS e aumentou com o teor de GGBFS, evidenciando o maior caráter ligante deste último resíduo [32].

Por outro lado, agora num contexto de substituição de ligante e agregado por agregados siderúrgicos, Baawain et al., (2021) investigaram as propriedades térmicas de argamassas incorporadas com dois tipos de resíduo de escória, escória de ferro e cromo (Fe-Cr) e escória de alto forno granulada (GGBS). Nas argamassas testadas foi substituída a areia fina pela escória de Fe-Cr em proporções de 0, 25, 50, 75 e 100%, em peso total de sólidos, em dois grupos. O primeiro grupo apenas com cimento Portland e o segundo com incorporação de 25% em peso de cimento Portland misturado com GGBS. A incorporação de agregados de escória Fe-Cr em 25, 50, 75 e 100% provocou uma diminuição de resistência na ordem de 5.7%, 23.7%, 28% e 41.5%, respetivamente, explicado pelo facto de esta escória apresentar uma menor proporção de agregados mais finos, o que afetou negativamente a qualidade do empacotamento das partículas, gerando vazios permeáveis no interior da estrutura. No entanto, a utilização de GGBS em substituição de 25% em peso de cimento compensou a perda de resistência à compressão, dado o seu caráter ligante. De facto, uma argamassa com 25% de escória Fe-Cr e o resíduo GGBS obteve um ganho de resistência em 10%, e uma argamassa com 50% de escória Fe-Cr e a adição de GGBS foi capaz de recuperar cerca de 19% de resistência em relação à argamassa de referência, sem adição de resíduos.

Já em relação à densidade, Baawain et al., (2021) verificaram que a incorporação de agregados de escória Fe-Cr provocou uma diminuição considerável da densidade, traduzindo-se num aumento do teor de vazios na estrutura da argamassa com o aumento do teor da escória. Já a adição de GGBS como substituto parcial do cimento aumentou

ligeiramente a densidade de todas as argamassas, em comparação às argamassas sem incorporação deste resíduo. Em relação à condutibilidade térmica, esta diminuiu em 2.9%, 7%, 10.6% e 15.5%, quando incorporaram 25, 50, 75 e 100% de agregados de escória de Fe-Cr, respetivamente. A utilização de escória de GGBS provocou um aumento na condutibilidade térmica devido ao aumento de densidade, sendo o maior aumento notado na argamassa sem incorporação conjunta das duas escórias, uma vez que a escória de alto forno granulada é mais densa que a escória de ferro e cromo [33].

No mesmo sentido, A. Santamaría et al., (2020) efetuaram um estudo que teve como objetivo desenvolver e testar argamassas autocompactáveis incorporando escórias de forno elétrico a arco (EAFS) como agregado e ainda uma escória de forno da panela de alta sílica (LFS), que substituiu 30% de ligante e 70% de agregado fino. Para as referidas argamassas e como a trabalhabilidade é uma das mais importantes características frescas de uma mistura autocompactável, o teor de água foi ajustado de modo que o espalhamento fosse de 180 mm e que o tempo de passagem no funil para avaliação da viscosidade ficasse entre os 7 e 11 segundos, seguindo as recomendações dadas pela EFNARC (*The European guidelines for self-compacting concrete*). Posto isto, foram avaliadas propriedades como a densidade e a resistência mecânica, das quais se aferiu que relativamente à argamassa de referência, a densidade das argamassas com agregado de EAFS aumentou cerca de 11%. Consequentemente, a resistência mecânica aumentou com a introdução dos resíduos e à medida que aumentou o tempo de cura das argamassas [34].

Por outro lado, Castro Mendes et al., (2020) avaliaram a viabilidade da utilização de resíduos de mineração e industriais como agregados de argamassas de revestimento em termos do desempenho térmico das mesmas. Para isso, foram selecionados quatro agregados, uma areia fina como referência, resíduos de minério de ferro (IOT), um quartzito friável (QTZ) e uma escória de aciaria (SLG), sendo estes três últimos utilizados para substituição do agregado fino. Os resultados obtidos mostraram que, apesar de o agregado IOT ser mais denso que a areia de referência, as argamassas com este resíduo apresentaram uma menor densidade do que a referência, provavelmente devido ao ar aprisionado durante a mistura. Por outro lado, as argamassas cuja constituição envolvia o quartzito friável apresentaram uma porosidade e densidade semelhante às da referência, devido à semelhança das características físicas e químicas semelhantes. Por fim, as argamassas com SLG, embora tendo a maior densidade devido ao SLG, apresentava entre todas as misturas o maior índice de vazios, após a mistura deste resíduo. Assim, em

relação à condutibilidade térmica, todas as argamassas tiveram um decréscimo em relação à referência. Nas argamassas com incorporação de IOT e QTZ, a estrutura porosa formada pelos agregados foi a responsável por essa diminuição assim como nas argamassas com incorporação de SLG, onde a condutibilidade térmica foi a mais baixa das argamassas ensaiadas [35].

Na mesma perspectiva de substituição dos agregados por escórias, Santamaría-Vicario et al., (2016) realizaram um estudo no qual se aplicou, em simultâneo, a escória de forno de arco elétrico em substituição da areia siliciosa e uma escória de forno de panela, em substituição do filler calcário, tendo ainda sido incorporados como adjuvantes um agente de retenção de água e dois plastificantes distintos. Os teores de substituição foram de 25%, 50%, 75% e 100%, tendo sido avaliadas as propriedades das argamassas como a trabalhabilidade e a resistência mecânica. A quantidade de água adicionada às misturas foi distinta, uma vez que o objetivo inicial seria alcançar uma trabalhabilidade de 175 ± 10 mm. Concluíram que nas argamassas com introdução destes adjuvantes e escórias, a absorção de água e a permeabilidade ao vapor de água aumentaram consideravelmente, em relação direta com a redução da densidade e, conseqüentemente, com o aumento da porosidade. Como visto em outros estudos recentes, a densidade das argamassas no estado endurecido é proporcional à quantidade de escória adicionada, no entanto, diminui quando este tipo de adjuvantes usados são adicionados, devido ao ar que estes compostos adicionam nas argamassas, obtendo-se materiais mais trabalháveis. A resistência mecânica das argamassas com incorporação de escórias aumenta com o aumento do teor das mesmas e aumenta à medida que o tempo de cura aumenta [36].

Ozturk et al., (2018) utilizou a escória de forno a arco elétrico em argamassas cimentícias como substituto da areia natural, com teores de incorporação de 10%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, tendo sido de seguida avaliadas, entre outras características, a resistência mecânica. Uma vez que as partículas da escória apresentam uma forma irregular, a aderência entre estas e o cimento aumenta, melhorando as propriedades do cimento, pelo que, neste estudo, averiguou-se que, com o aumento do teor de agregado de escória na argamassa, a resistência mecânica aumentava até 40% de substituição, sendo que com este teor se atinge a máxima resistência à flexão e à compressão, respetivamente, 30% e 18% superior à da argamassa de referência. Após este teor de substituição, a resistência mecânica diminui ligeiramente, mantendo-se contudo sempre superiores à da argamassa de referência [37].

Desta forma, e tendo em consideração os estudos aqui descritos, tentar-se-á nesta dissertação, procurar a introdução de resíduos densos substituindo agregados naturais nas formulações das argamassas ou betonilhas, para que com a sua substituição, se consiga valores de densidade e de transmissão térmica superiores.

3.2.2. Utilização de Materiais de Mudança de Fase

Neste trabalho efetuou-se outra abordagem para a melhoria do desempenho térmico das argamassas a aplicar em pavimentos radiantes, que passou pela incorporação de PCM na forma microencapsulada na formulação da argamassa para a camada de enchimento.

Nesse sentido, evidenciam-se aqui alguns trabalhos de autores como Cunha et al., (2018), que combinaram PCM's e resíduos de cinzas volantes numa betonilha e avaliaram posteriormente o comportamento térmico da mesma. Nesta experimentação, foi avaliado o efeito de diferentes teores de incorporação de resíduo, nomeadamente, a 20%, 40% e 60% de substituição em massa de cimento e avaliado também o efeito do PCM microencapsulado colocado em conjunto com o resíduo, mas em 40% da massa do agregado. Foram ainda incorporadas fibras de poliamida, em 1% da massa de cimento, com o intuito de evitar elevados níveis de retração. A avaliação dos espaços onde estas argamassas foram colocadas mostrou que, com as argamassas sem incorporação de PCM, eles apresentavam maiores flutuações de temperatura, em comparação com as argamassas aditivadas com PCM onde havia uma mitigação das flutuações de temperatura ambiente resultado da emissão e absorção de calor pelo PCM. Assim, a incorporação de PCM nas argamassas revelou temperaturas interiores mais estáveis e durante um período mais longo, ou seja, permitiu a redução do tempo de operação dos sistemas de aquecimento e/ou arrefecimento. Mais especificamente, ao incorporar 40% de PCM, a temperatura máxima em arrefecimento diminuiu cerca de 5% e a temperatura mínima de aquecimento aumentou cerca de 15%. Do mesmo modo, as argamassas aditivadas com 40% de PCM e 20% cinzas volantes, apresentaram, em relação à referência, uma diminuição de temperatura máxima e um aumento da temperatura mínima de, aproximadamente, 7% e 20%, respetivamente. Por fim, em relação às necessidades de arrefecimento e aquecimento, foi evidenciado que, ao incorporar apenas PCM na argamassa de referência, estas necessidades diminuíram cerca de 14% e 13%, respetivamente. A incorporação de 20% de cinzas volantes levou a uma diminuição de 2% e 10%, respetivamente. Por outro

lado, a incorporação simultânea dos dois aditivos (40% de PCM e 20% de cinzas volantes) provocou a maior diminuição das necessidades de arrefecimento e aquecimento, de ordem de 18% e 23%, respetivamente. O aumento deste teor de resíduo (cinzas volantes) não foi benéfico, uma vez que foi com 20% de cinzas volantes que se notou uma redução mais elevada da temperatura máxima, bem como um aumento mais elevado na temperatura mínima, o que também levou a um maior desfasamento temporal e, além disto, a menores necessidades de climatização [38].

Foi também desenvolvido um estudo por Olivieri et al., (2018) no qual se averiguou a influência da incorporação de materiais de mudança de fase microencapsulados em argamassas cimentícias nas propriedades térmicas das mesmas. O trabalho focou-se em dois ramos. O primeiro consistiu na investigação dos efeitos de diferentes agregados e aditivos para um teor de 28% de PCM, e o segundo pretendeu avaliar o efeito da alteração da quantidade de PCM entre 20% a 32% de volume total da amostra. Os resultados mostraram que quanto maior for o teor de PCM microencapsulado, maior será a redução da densidade, uma vez que se substitui um agregado mais denso por um menos denso, e também porque aumenta o teor de ar quando se introduz o PCM. Em concreto, quando se incorpora 20% de PCM microencapsulado, a densidade diminui de 1,7 kg/dm³ para 1,4 kg/dm³ e a argamassa passa de 3% para 8% de ar ocluído na mistura. No que diz respeito às propriedades térmicas, a condutibilidade e a difusividade diminuem, respetivamente, cerca de 17% e 31% quando se incorpora 20% ou 32% de PCM em comparação a argamassa de referência. Além disto, os resultados permitiram concluir que o aumento do teor de PCM aumenta o potencial de armazenamento de energia, mas a inércia térmica apresenta um limite superior, devido à diminuição relevante tanto da condutibilidade térmica como da densidade [39].

Por fim, foi desenvolvido um estudo por Figueiredo et al., (2016) com o objetivo de quantificar a influência do PCM microencapsulado sobre as propriedades mecânicas e térmicas do betão, onde se incorporou 3.2% em relação ao peso de 1m³ do betão de PCM's, concluindo-se que esta incorporação, apesar de provocar uma diminuição de 68% e 51% na resistência à compressão e à flexão, respetivamente, reduz os picos de temperatura do ar interno e atenua as oscilações diárias de temperatura, o que se traduz num bom potencial no efeito de termorregulação [40].

O estudo e desenvolvimento de argamassas de cimento com incorporação de agregado siderúrgico, bem como com a incorporação simultânea deste agregado com material de

mudança de fase microencapsulado necessita de mais investigação. Assim, o principal objetivo deste trabalho focou-se no estudo e caracterização de argamassas com incorporação de um resíduo siderúrgico e na incorporação de PCM em argamassas ou para pavimentos radiantes.

Capítulo 4

Metodología experimental

4. Metodologia experimental

O estudo levado a cabo nesta dissertação teve como principal objetivo o desenvolvimento e caracterização de argamassas para aplicação em pavimentos radiantes, melhoradas com a incorporação de resíduos siderúrgicos, de modo a manipular a densidade e a condutibilidade térmica das argamassas resultantes e, posteriormente, ajustar também a incorporação de materiais de mudança de fase microencapsulados para melhorar a função de armazenamento energético. Pretendeu-se também efetuar uma avaliação por simulação numérica do desempenho térmico de argamassas selecionadas, quando aplicadas num sistema de pavimento radiante.

Desta forma, o plano experimental compreendeu duas linhas de ação. A primeira focou-se ao nível dos materiais constituintes do sistema e consistiu em desenvolver e caracterizar argamassas cimentícias melhoradas com a incorporação de dois aditivos. A incorporação dos aditivos nas argamassas foi realizada de forma individual e conjunta. Primeiro testou-se a incorporação de um Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC) como substituto parcial ou total dos agregados naturais médio e grosso, de modo a também valorizar a utilização de resíduos no sector da construção, aliando-se o facto de ser um material com uma densidade elevada, o que possibilita a manipulação da porosidade dos materiais, afetando a sua condutibilidade térmica. O foco foi conseguir aumentar a trabalhabilidade das argamassas, sem sacrifício das propriedades mecânicas e térmicas. De seguida, incorporou-se também um material de mudança de fase (PCM) microencapsulado, em substituição da areia fina, de modo a melhorar a capacidade de armazenamento energético. Assim, e comparando estas argamassas modificadas a uma de referência, sem qualquer aditivo, foram estudados os impactos ao nível das características no estado fresco e endurecido destes materiais. No estado fresco foi avaliada a trabalhabilidade e no estado endurecido examinou-se a densidade, resistência mecânica e capilaridade, posteriormente foi avaliada a condutibilidade térmica das argamassa selecionadas.

Na segunda linha de ação, e com base nos resultados obtidos na primeira fase, foi estimado por simulação numérica o comportamento térmico das argamassas desenvolvidas quando aplicadas num sistema de pavimento radiante hidráulico. A modelação efetuou-se com recurso ao *software FEMIX*, num modelo numérico previamente calibrado e validado no âmbito de um artigo já publicado [41].

O capítulo 4 apresenta de forma detalhada, os procedimentos de ensaios efetuados no decorrer do trabalho laboratorial, os materiais utilizados para as formulações e respetivos ensaios de caracterização das argamassas desenvolvidas, bem como informação sobre a avaliação das suas propriedades no estado fresco e endurecido e, por fim, os dados e premissas da simulação numérica.

4.1. Formulação de argamassas para sistemas de pavimento radiante

4.1.1. Caracterização dos materiais constituintes das argamassas

Neste capítulo são descritos e caracterizados todos os materiais utilizados para o desenvolvimento das argamassas.

O cimento utilizado foi fornecido pela empresa *Saint-Gobain Portugal, S.A.*, tratando-se de um CEM II/A-L 42.5 R (cz), que, segundo a NP EN 197-1, consiste num Cimento Portland composto (CEM II), de calcário (A-L), com 80 a 94% de clínquer, 6 a 20% de calcário e 0 a 5% de constituintes adicionais minoritários [42].

A água de amassadura desempenha três principais funções, a hidratação do cimento, a molhagem dos agregados e o ajuste da trabalhabilidade da argamassa fresca. A água utilizada no desenvolvimento das argamassas foi a da rede de consumo do município de Aveiro.

Foram usados agregados naturais e um agregado siderúrgico (resíduo denominado de ASIC). Os agregados naturais foram três areias com diferentes granulometrias. O agregado mais fino trata-se de um filler com a denominação de areia S50, o agregado de dimensão média é uma areia denominada por *Eco-chorreio* e o agregado mais grosso é uma areia calcária com dimensões entre 1.5 e 3.0 mm, todos fornecidos pela empresa *Saint-Gobain Portugal, S.A.*. Na Figura 4.1 apresentam-se os três agregados utilizados no desenvolvimento das formulações.

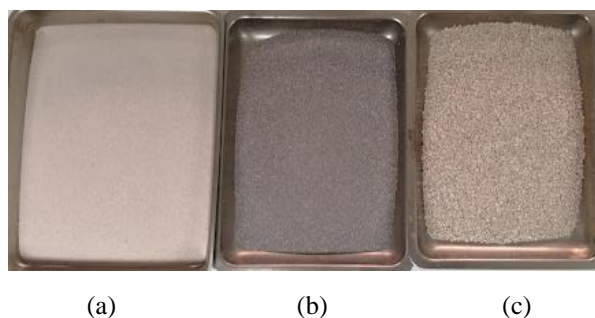


Figura 4.1 - Agregados: a) Areia S50; b) Eco-chorreio; c) Calcário 1.5-3.0

O Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC) trata-se de um subproduto proveniente da indústria metalúrgica do aço que, depois de acondicionado, triado, lavado e britado, torna-se num agregado artificial, passível de ser usado na construção. O ASIC é um produto certificado com a Marca CE segundo a norma EN 13242, disponibilizado pela empresa *Harsco Environmental*, a partir das instalações da Siderurgia Nacional na Maia (SN Maia – grupo MEGASA).

O ASIC é comercializado em diferentes frações e a usada foi o ASIC 0/40, ou seja, com dimensões de partículas entre 0 e 40 mm. Segundo a EN 13242 o ASIC é classificado como um agregado de granulometria extensa. No entanto, como era pretendido que o ASIC substituísse a areia Eco-Chorreio e o Calcário 1.5-3.0, foi necessário moer e peneirar esta amostra, de modo que a maior dimensão do agregado fosse de 4 mm. Para isso, procedeu-se a uma peneiração inicial. Todo o material foi passado numa série de peneiros de 16 mm, 4mm e fundo. Assim, foi possível separar o resíduo em três frações distintas: superior a 16 mm, entre 4 e 16 mm e inferior a 4 mm (Figura 4.2). Posteriormente, com todo o material dividido nestas três frações, o material cuja dimensão excedia os 16 mm foi moído num moinho de mandíbulas (Figura 4.3 (a)). Por fim, a fração cuja dimensão era ainda superior a 4 mm foi moída num moinho de martelos (Figura 4.3 (b)). Desta forma, foi possível obter todo o ASIC com uma dimensão máxima de 4 mm.

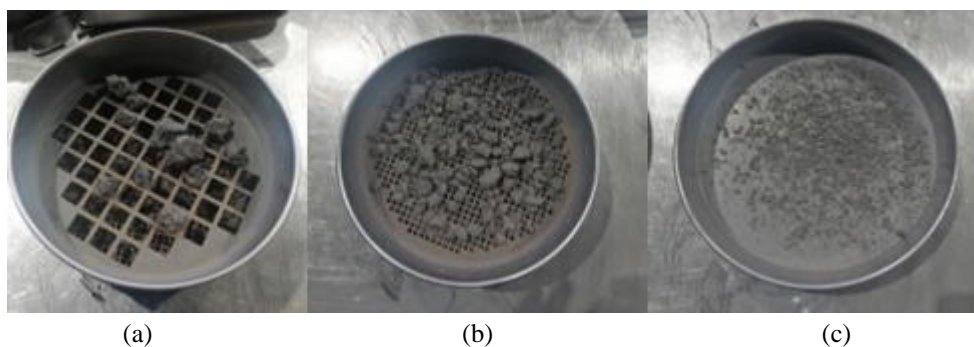


Figura 4.2 - Separação do ASIC em 3 frações iniciais distintas: a) superior a 16mm; b) entre 4 e 16 mm; c) inferior a 4mm



(a)



(b)

Figura 4.3 – a) Moinho de mandíbulas b) Moinho de martelos

Foram realizados ensaios de caracterização dos quatro agregados, tais como a análise da distribuição granulométrica por peneiração, a determinação da massa volúmica real, determinação da baridade e volume de vazios. Todos os ensaios respeitaram as normas vigentes, de seguida referenciadas.

Distribuição granulométrica por peneiração

A distribuição granulométrica dos agregados foi realizada segundo a norma NP EN 933-1: 2000, a qual estabelece que, por meio de uma série de peneiros de diâmetros decrescentes, o material é separado em diferentes classes granulométricas, obtendo teores cumulativos de material retido, passado e acumulados em cada um dos peneiros, as quais dão origem às curvas granulométricas dos diferentes materiais [43].

De notar que a validação dos resultados requer que seja cumprida em termos de perdas a seguinte expressão.

$$\frac{M_2 - (\sum R_t + P)}{M_2} \times 100 < 1\% \quad (4.1)$$

onde:

- M_2 – massa seca do material com granulometria superior a $63 \mu\text{m}$ [kg]
- R_i – massas das diferentes frações dos materiais retidos [kg]
- P – massa do material peneirado retido no recipiente do fundo [kg]

Na Figura 4.4 apresenta-se a divisão obtida de material retido em cada peneiro, para cada um dos agregados ensaiados.

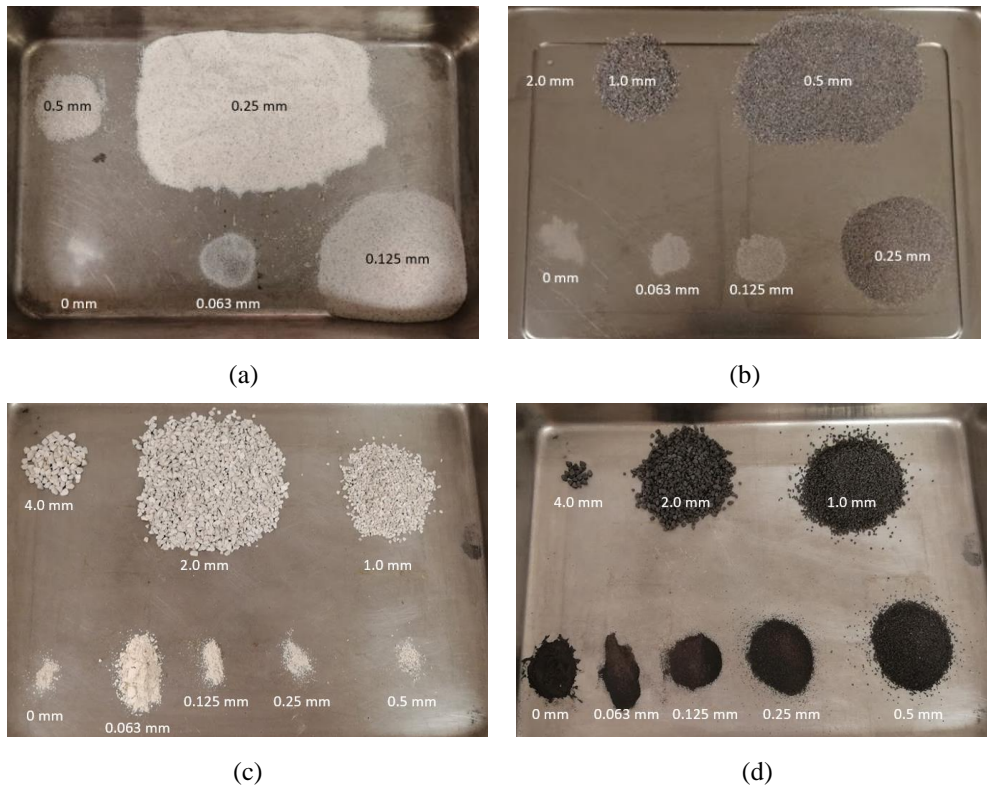


Figura 4.4 - Material retido nos diferentes peneiros, em cada um dos agregados: a) Areia S50; b) Areia Eco-Chorreio; c) Calcário 1.5-3.0; d) ASIC

As curvas granulométricas oriundas deste processo são apresentadas na Figura 4.5, num gráfico, cujas abcissas correspondem à abertura dos peneiros, em mm, e as ordenadas correspondem às percentagens do material passado acumulado.

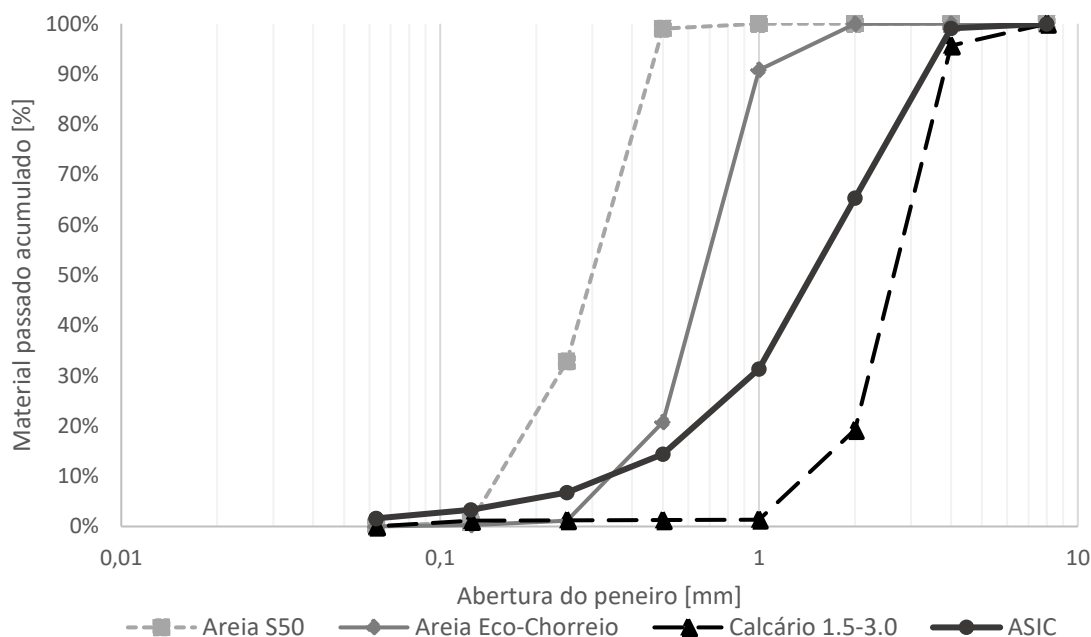


Figura 4.5 - Curvas granulométricas dos agregados

Determinação da massa volúmica real

A determinação da massa volúmica dos agregados foi realizada pelo método do picnómetro, segundo a norma NP EN 1097-6: 2003, que se obtém pela relação entre a massa de uma amostra de agregado seca em estufa e o volume que esta amostra ocupa dentro de água, incluindo quaisquer poros internos fechados mas excluindo poros acessíveis à água [44]. De notar que apenas foi determinada a massa volúmica do material impermeável das partículas. Foi assim possível obter a massa volúmica real do material impermeável das partículas, calculado pela seguinte expressão, sendo os resultados apresentados na Figura 4.6.

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)] / \rho_w} \quad (4.2)$$

onde:

- ρ_A – massa volúmica do material impermeável das partículas
- M_2 – massa do picnómetro contendo o provete de agregado saturado [g]
- M_3 – massa do picnómetro apenas cheio de água [g]
- M_4 – massa no ar do provete seco [g]

Determinação da baridade e volume de vazios

A determinação da baridade dos agregados seguiu as diretrizes da norma vigente NP EN 1097-3: 2002 que estabelece o método de ensaio de determinação da baridade e do volume de vazios do agregado [45].

A baridade define-se como o quociente entre a massa do agregado seco que preenche um recipiente sem compactação e o volume desse mesmo recipiente. A baridade foi determinada segundo a expressão:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad [Mg/m^3] \quad (4.3)$$

onde:

- ρ_b – baridade [Mg/m^3]
- m_1 – massa do recipiente vazio [kg]
- m_2 – massa do recipiente cheio de material [kg]
- V – capacidade do recipiente [l]

O volume de vazios foi calculado a partir da baridade e da massa volúmica real, permitindo ter uma indicação dos espaços cheios de ar entre os agregados contidos num dado recipiente, sendo determinado segundo a equação:

$$volume\ de\ vazios = \frac{\rho_a - \rho_b}{\rho_a} \quad (4.4)$$

onde:

- ρ_a – massa volúmica real do agregado [Mg/m^3]
- ρ_b – baridade [Mg/m^3]

Os resultados são apresentados na Figura 4.6.

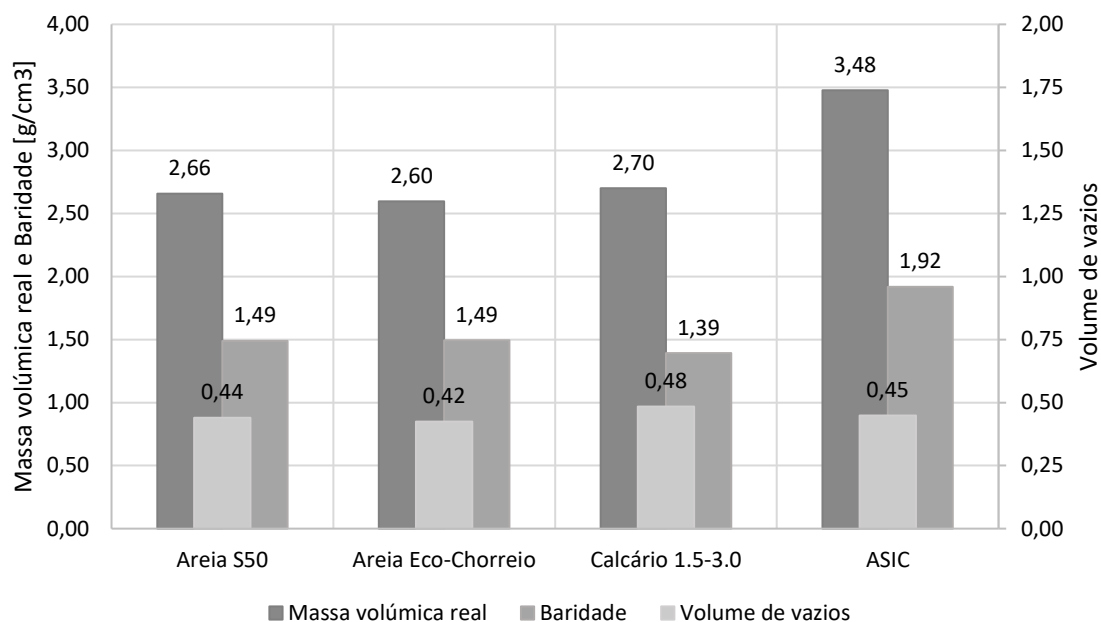


Figura 4.6 - Massa volúmica real, baridade e volume de vazios dos agregados

A Figura 4.6 mostra que o ASIC é o agregado que possui maior massa volúmica real e baridade. Ao mesmo tempo que o ASIC é o material mais denso, o agregado calcário é o mais poroso. Os restantes agregados apresentam valores de massa volúmica real e baridade da mesma ordem de magnitude.

Materiais de mudança de fase nas formulações

Foram também utilizados materiais de mudança de fase (*Phase Change Material – PCM*) como substituto da areia S50 (filler) nas argamassas formuladas, nomeadamente o PCM da Micronal® da *BASF* e o PCM CrodaTherm™ da *CRODA Ibérica, Espanha*, cujas temperaturas de fusão de pico são de 26°C e 28.8 °C, respetivamente. O PCM microencapsulado Micronal® DS 5001 X é uma cera de parafina envolvida por uma cápsula de polimetilmetacrilato (PMMA). Já o PCM microencapsulado CrodaTherm™ ME 29P é uma cera de base biológica com um invólucro de polímero acrílico. Na Figura 4.7 são apresentadas duas imagens de microscopia eletrónica de varrimento (SEM) com ampliação de 400 × referente ao PCM Micronal® DS 5001 X e ao PCM CrodaTherm™ ME 29P. A caracterização destes materiais baseia-se nas informações providas pelos fornecedores, sendo apresentadas no Quadro 4.1.

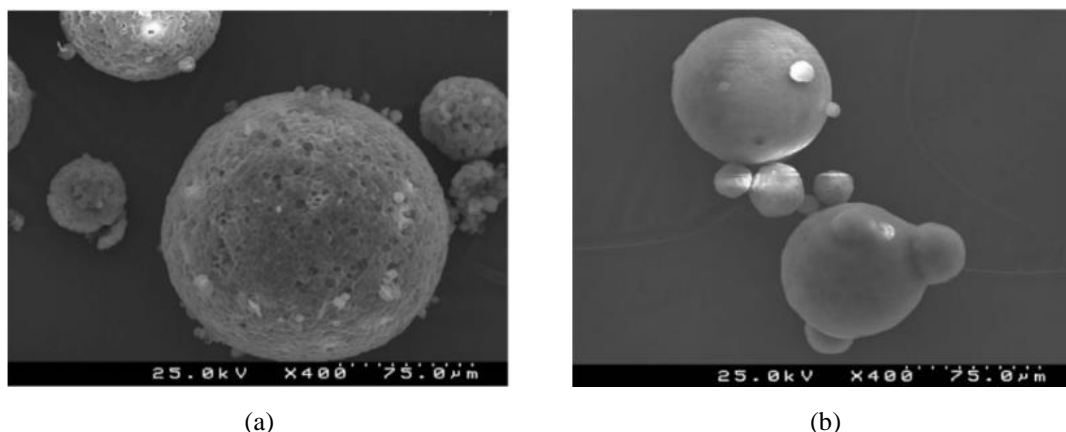


Figura 4.7 - Imagens SEM com ampliação de $\times 400$: a) PCM Micronal® DS 5001 X; b) PCM CrodaTherm™ ME 29P. Reproduzido de [46]

Quadro 4.1- Dados dos materiais de mudança de fase.

Designação do produto	Temperatura de fusão de pico [°C]	Capacidade de calor latente [kJ.kg ⁻¹]	Massa volúmica [kg.m ⁻³]
Micronal® DS 5001 X	26.0	110	250-350
CrodaTherm™ ME 29P	28.8	183	337

Adjuvantes nas formulações

Foram utilizados na formulação das argamassas dois adjuvantes, um agente redutor de água e um agente retentor de água. O redutor de água ou superplastificante utilizado foi o Glenium 52, BASF®, à base de éter policarboxilato modificado de elevado desempenho. A adição de superplastificante procura melhorar as propriedades das argamassas desenvolvidas no estado fresco, evitando a agregação de partículas de cimento, possibilitando a diminuição da quantidade de água. A estrutura molecular deste superplastificante à base de policarboxilato contém uma cadeia principal que adere às partículas de cimento, causando um efeito de repulsão nas mesmas [47]. O retentor de água utilizado foi o Walocel™ MKS10000 PF60, à base de hidroxipropilmetilcelulose, tendo como principal função evitar a perda de água em substratos porosos e absorventes como as argamassas em estudo. Além disso, os retentores de água podem ser utilizados para alterar o tempo de presa de ligantes hidráulicos e proporcionar condições adequadas de processamento industrial. Note-se, no entanto, que a utilização excessiva de retentores

de água pode causar excessiva incorporação de ar nas argamassas e reduzir a consistência das mesmas [48, 49].

4.1.2. Desenvolvimento e caracterização de argamassas

No desenvolvimento das argamassas, foram respeitadas as indicações fornecidas pela norma EN 196-1:2016 [50]. Sucintamente, pesou-se e misturou-se os materiais sólidos, de seguida foi adicionada a água e, quando aplicável, os adjuvantes, procedendo-se à mistura manual com uma espátula, seguida da mistura mecânica com recurso a uma misturadora cujas características respeitavam a referida norma. Após 2 minutos de mistura, realizaram-se os ensaios referentes à caracterização em estado fresco, seguindo-se a moldagem dos corpos de prova, regida pela mesma norma. As amostras foram desmoldadas após dois dias de cura e acondicionadas em câmara climática a 20°C e 95% de humidade relativa durante 28 dias, seguindo-se as respetivas caracterizações em estado endurecido, regidas pelas respetivas normas.

Foi desenvolvida uma formulação de referência cujos teores relativos de cada constituinte foram fornecidas pela empresa *Saint-Gobain Portugal, S.A.*, tendo sido dada como argamassa de referência (AR). Nesta formulação, o traço cimento:agregados, em massa, foi de 1:6 e o teor de cada constituinte da argamassa referência é apresentado no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Formulação da argamassa de referência

Materiais constituintes	Teor [%]
Cimento CEM II/A-L 42.5 R (cz)	15
Areia S 50	35
Areia Eco-Chorreio	35
Calcário 1.5-3.0	15

Com base na argamassa de referência, foram incorporados diferentes teores de ASIC, em substituição de dois agregados da mistura, a areia Eco-Chorreio e o Calcário 1.5-3.0, dado que o ASIC apresenta uma granulometria intermédia similar aos referidos agregados. As substituições realizadas foram, para cada formulação diferente, as apresentadas no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Argamassas com incorporação de ASIC

Denominação	Teor de substituição [%]		Teor de ASIC [%]
	Eco-Chorreio	Calcário 1.5-3.0	
AR	0	0	0
A25ASIC	50	50	25
A37.5ASIC	75	75	37.5
A50ASIC	100	100	50
A35ASIC	100	0	35

A incorporação do ASIC foi efetuada também com o intuito da valorização dos resíduos nos materiais de construção. Além disso, espera-se que este resíduo, por ser um material bastante denso, confira à camada de enchimento uma capacidade calorífica maior, dada à sua elevada densidade. Do ponto de vista da aplicação em sistemas de pavimentos radiantes, esta característica pode ser bastante benéfica.

Além da incorporação de ASIC, foi incorporado 20% de PCM nas formulações A35ASIC e A50ASIC, por substituição da areia S50. O material de mudança de fase, ao contrário do resíduo siderúrgico, é um material pouco denso (Quadro 4.1). No entanto, a sua capacidade de armazenar o calor latente irá contribuir para atenuar os picos de temperatura dentro dos edifícios, permitindo que as temperaturas interiores sejam mais equilibradas durante mais tempo, levando a uma redução do tempo de operação dos sistemas de pavimento radiante e consequente redução de consumos.

Como referido na secção 4.2.5., foram incorporados nas argamassas dois tipos distintos de PCM, PCM Micronal® e PCM CrodaTherm™. Assim, a incorporação de 20% de PCM na argamassa A35AASIC resultou em argamassas com a denominação de A35A20PM e A35A20PC, respetivamente. Na mesma lógica, na argamassa A50ASIC, as argamassas são denominadas A50A20PM e A50A20PC, respetivamente.

O Quadro 4.4 apresenta todos os constituintes de todas as formulações desenvolvidas no presente estudo. Para as diferentes formulações desenvolvidas, foi estudada a influência da quantidade de água adicionada, bem como a necessidade de presença ou ausência de adjuvantes, com o objetivo de aumentar a trabalhabilidade, sem comprometer a densidade das misturas, uma vez que para o efeito a que se propõe este trabalho, existe a necessidade de se obter uma argamassa que seja facilmente escoável neste tipo de aplicação.

4. Metodologia experimental

Quadro 4.4 Teores de materiais sólidos nas diferentes formulações

Denominação	Cimento	Areia	Areia	Calcário	ASIC	PCM
	II/A-L 42.5R [%]	S50 [%]	Eco-Chorreio [%]	1.5-3.0 [%]	[%]	[%]
AR	15	35	35	15	0	0
A25ASIC	15	35	17.5	7.50	25	0
A37.5ASIC	15	35	8.75	3.75	37.5	0
A50ASIC	15	35	0	0	50	0
A35ASIC	15	35	0	15	35	0
A35A20PM	15	15	0	15	35	20
A35A20PC	15	15	0	15	35	20
A50A20PM	15	15	0	0	50	20
A50A20PC	15	15	0	0	50	20

Com o fim de caracterizar cada mistura ao nível dos agregados constituintes de cada uma delas, procedeu-se também à determinação das distribuições granulométricas, bem como a determinação da massa volúmica real, baridade e volume de vazios.

Distribuição granulométrica das misturas

Com base nas curvas granulométricas de cada agregado, foram determinadas as curvas granulométricas de cada uma das formulações programadas. Para isso, efetuaram-se as conversões de teores de agregados para uma mistura de 100% de agregados, isto é, excluindo o ligante e a areia fina. De seguida, procedeu-se à execução das diferentes curvas referentes às diferentes formulações com teores de agregados diferentes. A construção destes gráficos (Figura 4.8) permite analisar a granulometria da mistura quando comparada à mistura de referência, avaliando se esta se aproxima de uma granulometria mais fina, intermédia ou mais grosseira.

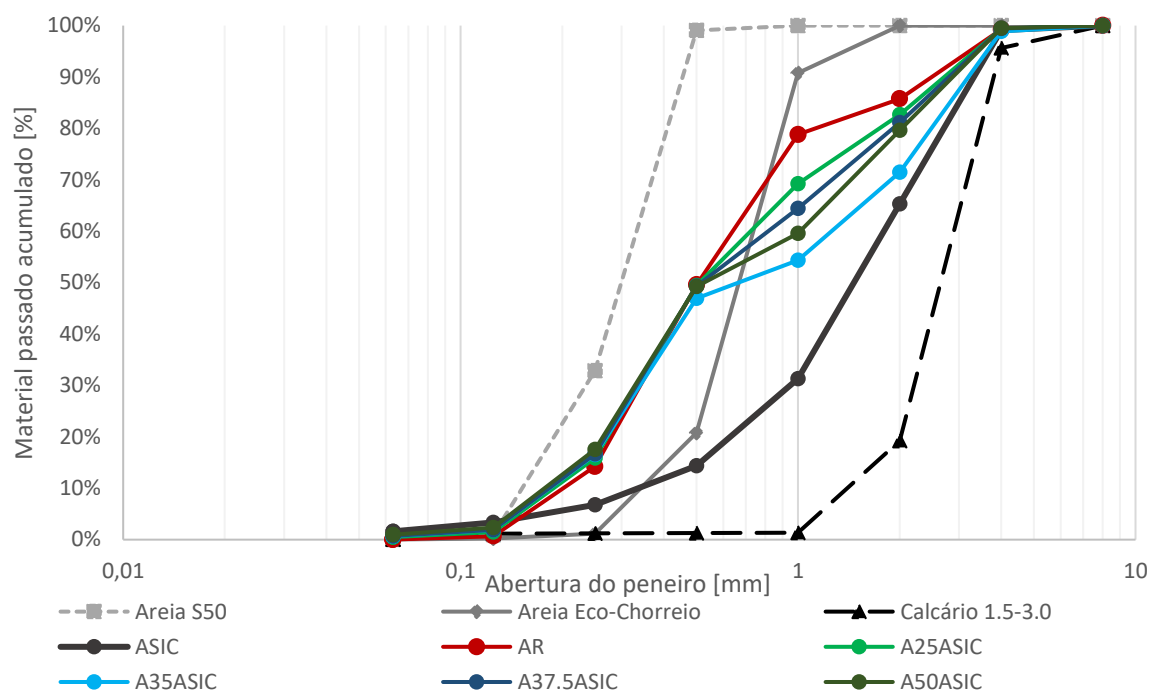


Figura 4.8 - Curvas granulométricas dos agregados e das formulações

Todas as misturas apresentam uma distribuição semelhante de teor de material passado acumulado entre os peneiros 0 a 0.25 mm e entre 4 a 8 mm. Entre os peneiros 0.25 a 4 mm, existem diferenças acentuadas na percentagem cumulativa passada, notando que todas apresentam uma granulometria média.

Massa volúmica real, baridade e volume de vazios das misturas

Para as diferentes formulações efetuadas, e contemplando apenas os agregados areia Eco-Chorreio, Calcário 1.5-3.0 e ASIC, foi determinada a massa volúmica real e a baridade que, em conjunto, permitem também obter o volume de vazios de cada uma das misturas, sendo que, quanto maior, mais poros terá cada uma e, conseqüentemente, maior absorção de água. Na Figura 4.9 são apresentados os resultados destas propriedades, notando que apenas foi realizado um provete de ensaio para cada formulação.

Por análise da Figura 4.9, é possível constatar que a incorporação de ASIC, de facto, provoca aumentos substanciais tanto na massa volúmica como na baridade das misturas. Ao mesmo tempo, este aumento acontece de forma proporcional, isto é, quanto maior o teor de resíduo, maior é o aumento da massa volúmica e da baridade das misturas, em comparação com a argamassa de referência. Por outro lado, a incorporação do ASIC não altera significativamente o volume de vazios. Na verdade, o volume de vazios das

4. Metodologia experimental

misturas é maior na formulação que não contém a areia Eco-Chorreio, seguindo-se a mistura que não contém nem este agregado, nem calcário. Estes resultados parecem indicar que a ausência do agregado de dimensão média (areia Eco-Chorreio) aumenta o volume de poros das misturas.

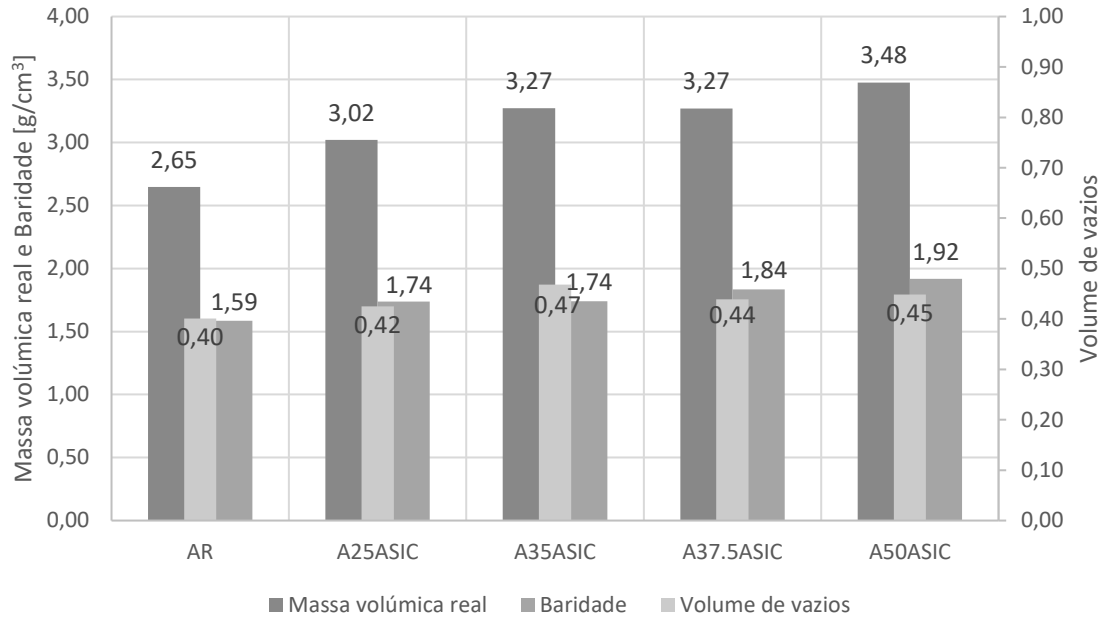


Figura 4.9 - Massa volúmica real, baridade e volume de vazios das misturas

4.1.2.1. Caracterização das formulações em estado fresco

Densidade aparente

Após realizada a mistura das argamassas, foi determinada a densidade aparente em fresco das mesmas, segundo a norma EN 1015-6. A densidade aparente é expressa pelo quociente entre a massa de uma amostra e o volume que ela ocupa, e determinada segundo a Equação 4.5 [51].

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_v} \quad [kg/m^3] \quad (4.5)$$

onde:

- ρ_m – densidade aparente de uma argamassa em estado fresco [kg/m³]
- m_1 – massa do recipiente vazio [g]
- m_2 – massa do recipiente com argamassa [g]
- V_v – volume do recipiente de medição [l]

Após misturar as formulações, pesou-se o recipiente vazio, depois colocou-se a amostra num recipiente, rasando-o, pesou-se o conjunto e, por fim, dividiu-se essa massa subtraída à massa do copo vazio pela capacidade do copo utilizado, obtendo-se a massa volúmica em fresco.

Consistência por espalhamento

A consistência é uma medida de fluidez da argamassa em estado fresco, quando submetida a um determinado tipo de forças exteriores e define a trabalhabilidade da mesma e o procedimento seguiu a norma em curso, EN 1015-3 1998 [52]. Não existia um valor de espalhamento pré-definido para ser alcançado, uma vez que o objetivo seria aumentar a trabalhabilidade ao máximo possível para melhorar a fluidez e escoamento sem que fossem comprometidas as propriedades mecânicas da argamassa.

4.1.2.2. Caracterização das formulações em estado endurecido

Densidade

A densidade foi determinada através do quociente da sua massa em condição seca e o volume que ela ocupa, dado pela multiplicação de todos os lados do provete. Assim, a norma seguida foi a EN 1015-10, quando aplicável [53]. A densidade aparente de cada formulação foi calculada pela Equação 4.6.

$$\rho_m = \frac{m_s}{V_s} \quad [kg/m^3] \quad (4.6)$$

onde:

- ρ_m – densidade de uma argamassa em estado endurecido [kg/m^3]
- m_s – massa seca em estufa do provete de argamassa endurecida [kg]
- V_s – volume do provete de argamassa endurecida [m^3]

Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado através do ensaio não destrutivo PUNDIT, que utiliza a velocidade de propagação de ultrassons entre o emissor e o recetor para estimar a rigidez interior do material. A velocidade de propagação da onda é calculada com base no tempo que a onda ultrassónica demora a percorrer determinada distância, tempo este dado pelo aparelho PUNDIT [54]. O módulo de elasticidade

dinâmico depende do coeficiente de Poisson, da velocidade de propagação da onda e da massa específica do material e é dado pela Equação 4.7.

$$E_d = \rho \cdot V^2 \frac{(1 + \delta)(1 - 2\delta)}{(1 - \delta)} \quad [MN/m^2] \quad (4.7)$$

onde:

- E_d – módulo de elasticidade dinâmico [MN/m^2]
- ρ – densidade [kg/m^3]
- V – velocidade de propagação da onda [km/s]
- δ – coeficiente de Poisson

Este ensaio realizou-se segundo a norma BS 1881-203:1986 [55]. Uma vez que o valor do coeficiente de Poisson não foi calculado, utilizou-se o valor médio de 0.25, comum em betões e argamassas cimentícias. Neste procedimento obteve-se o módulo de elasticidade dinâmico.

Resistência mecânica à flexão e à compressão

A caracterização das argamassas quanto à sua resistência à flexão e à compressão foi realizada conforme exposto na norma EN 1015-11:1999 [56]. O princípio do ensaio de resistência mecânica à flexão e à compressão é determinar o máximo esforço que o provete a ensaiar resiste quando submetido, respetivamente, a uma carga a meio vão que gera tensões axiais de tração e a uma carga no eixo do provete que gera tensões axiais de compressão, até que este atinja a rotura [57]. Conhecida a máxima força que leva o provete à rotura, calcula-se a resistência para cada um dos esforços, expressa pela Equação 4.8.

$$f = 1.5 \frac{F \ell}{b d^2} \quad [N/mm^2] \quad (4.8)$$

onde:

- F – força máxima aplicada ao provete [N]
- ℓ - distância entre os eixos dos apoios do provete [mm]
- b – largura do provete [mm]
- d – espessura do provete [mm]

O método de ensaio adotado consistiu, em primeiro lugar, por realizar o ensaio à flexão. De seguida, com o provete dividido em duas metades, é utilizada uma delas para realizar o ensaio à compressão. Ambos os ensaios descritos foram realizados numa máquina universal de ensaios mecânicos de marca *Shimadzu*, modelo AG-IC 100 kN.

Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade depende da microestrutura da argamassa e das características da água cuja argamassa absorve. Dado que a capilaridade envolve duas forças (adesão e coesão) que são criadas quando a água entra em contacto com a superfície sólida do provete, este ensaio permite relacionar o coeficiente de capilaridade com a velocidade de absorção da água [58]. Quanto maior for o coeficiente de absorção de água por capilaridade, maior será a velocidade de absorção de água na argamassa.

A norma seguida para realização do presente ensaio foi a EN 1015-18: 2002, que indica que, após secagem até massa constante, uma face do provete é imersa em 5 a 10 mm de água durante 90 minutos, sendo determinado o aumento de massa durante o período de tempo definido [59]. Neste caso, foram pesados os provetes aos 5, 10, 20, 40, 60, 80 e 90 minutos, sendo que em cada pesagem foi tido o cuidado de secar a água livre nos provetes com um pano húmido. Por fim, determinou-se o coeficiente de capilaridade, que é igual ao declive de uma linha reta entre a diferença de massa do provete entre os 10 e 90 minutos, conforme a Equação 4.9.

$$C = 0.1 (M2 - M1) \quad [kg/m^2min^{0.5}] \quad (4.9)$$

onde:

- C – coeficiente de capilaridade [$kg/m^2min^{0.5}$]
- M1 – massa do provete ao fim de 10 minutos de absorção de água [g]
- M2 – massa do provete ao fim de 90 minutos de absorção de água [g]

Absorção de água

A determinação da absorção de água das argamassas tem como principal objetivo determinar a massa de água que uma argamassa é capaz de absorver durante 24 horas de saturação. Após o processo laboratorial, foi determinada a percentagem de absorção de água de cada provete, com base na Equação 4.10.

$$A_{ag} = \frac{m_{saturado} - m_{seco}}{m_{seco}} \times 100 \quad [\%] \quad (4.10)$$

onde:

- A_{ag} – Absorção de água [%]
- $m_{saturado}$ – massa do provete saturado [g]
- m_{seco} – massa do provete seco [g]

Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica de uma argamassa indica a capacidade do material transferir calor, dependendo, não só da densidade do material, mas também da dimensão dos poros e da sua microestrutura [60].

Este ensaio foi realizado no laboratório de ensaios do Centro Tecnológico de Cerâmica e do Vidro (CTCV) em Coimbra, tendo sido realizados com provetes de forma circular, com diâmetro de 50 mm e espessura de 15 mm e utilizado o equipamento Holometrix C-Matic, modelo TCA-200. Este equipamento mede a condutibilidade térmica dos materiais sólidos pelo método do medidor de fluxo de calor de placa protegida. É colocada uma amostra entre duas placas com diferentes temperaturas controladas, resultando um fluxo de calor entre a placa mais quente para a mais fria. Com este método, a quantidade de calor é medida com um transdutor de fluxo de calor que se encontra conectado a uma das placas de temperatura controlada. À volta da amostra, de modo a minimizar a transferência lateral de calor, existe um aquecedor de proteção cilíndrico com a temperatura média da amostra.

4.2. Simulação numérica de sistemas de pavimento radiante

No presente estudo foi realizada uma simulação numérica com o objetivo de avaliar o impacto no comportamento térmico e taxa de aquecimento da incorporação do agregado siderúrgico na camada de enchimento, isto é, a argamassa, no sistema de pavimento radiante. A simulação realizada teve por base um modelo de constituição comum de pavimento radiante hidráulico, recorrendo ao *software* FEMIX [41]. Tendo sido analisada

a distribuição das temperaturas superficiais da laje com várias formulações de argamassa sem revestimento final.

O *software* FEMIX recorre ao Método dos Elementos Finitos e desenvolve-se segundo a forma geral, em coordenadas cartesianas tridimensionais, da equação da transferência de calor (Equação 4.11).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.11)$$

Onde, no caso de materiais isotrópicos:

- $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$ – Condutibilidade térmica;
- \dot{Q} – Taxa de geração interna de calor por unidade de volume do volume de controlo infinitesimal;
- ρ – massa por unidade de volume;
- c – calor específico do material.

Na presente simulação, foram utilizadas temperaturas prescritas para simular a temperatura da água e a condição de convecção na superfície superior da laje. Para as condições de teste foi definido que o sistema de água estava a funcionar durante 6h contínuas, em que a temperatura da água aumenta gradualmente começando com 20°C até aos 45°C, conforme apresentado na Figura 4.10. A temperatura do ar foi definida como sendo constante a 18°C. A malha do modelo numérico é constituída por 31200 elementos e 35139 nós, sendo esta representada pela Figura 4.11, juntamente com o esquema da secção transversal da laje. Como já referido, foram utilizadas diferentes propriedades da argamassa, isto é, diferentes valores de condutibilidade térmica e densidade para avaliar a influência sobre a transferência de calor até à superfície da laje, comparando com a argamassa de referência (AR). Os dados das propriedades dos materiais utilizados nas simulações são apresentados no Quadro 4.5.

O estudo paramétrico iniciou-se pela introdução dos dados referentes às propriedades dos materiais e temperaturas operativas da água e do ar ambiente no *software* de simulação. A simulação tem um passo de cálculo (*step*) de uma hora para o cálculo da temperatura em todos os nós do modelo. De seguida, através do *software* Spyder, com introdução dos dados obtidos no FEMIX, foi possível fazer o pós-processamento dos dados, obtendo-se uma saída gráfica, isto é a distribuição de temperatura.

4. Metodologia experimental

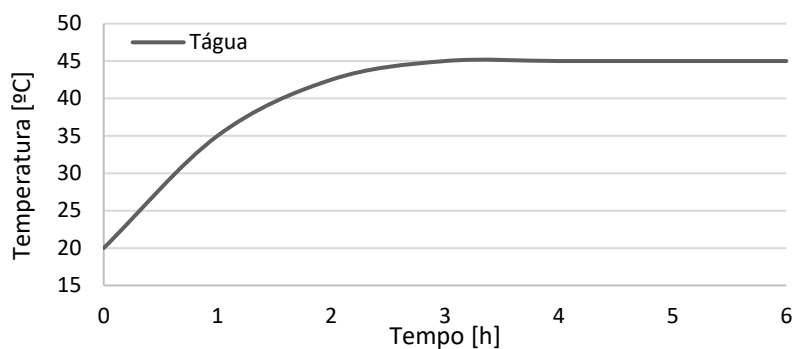


Figura 4.10 - Perfil da temperatura da água

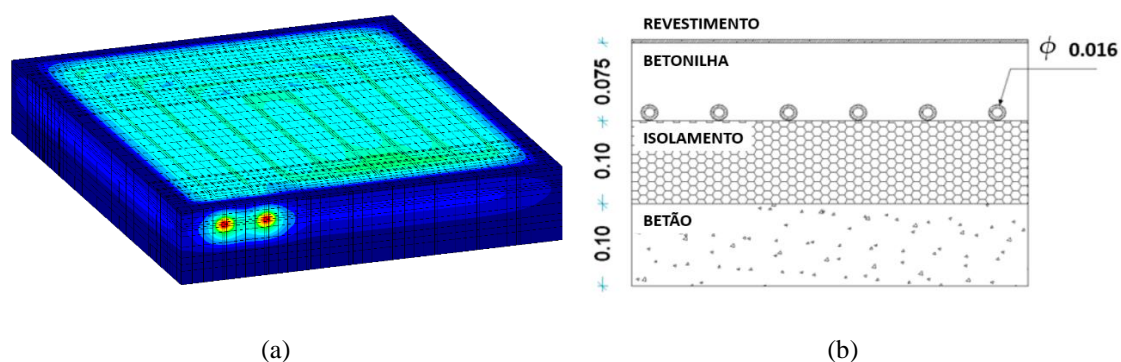


Figura 4.11 – Esquema do pavimento radiante simulado: (a) Modelo tridimensional; (b) Secção transversal (dimensões em metros) - Adaptado: [41]

Quadro 4.5 - Propriedades dos materiais utilizados no modelo de simulação

Material	Densidade [kg/m ³]	Condutibilidade térmica [W/m.K]	Calor específico [J/kg.K]
Argamassa AR (referência)	2029	0.71	800
Argamassa A35ASIC_13W	2305	0.87	800
Argamassa A50ASIC_13W	2389	0.77	800
Isolamento (base e laterias)	2500	2.00	1000
Betão	70.5	0.04	1000

Capítulo 5

Estudo de argamassas para sistemas de
pavimento radiante

5. Estudo de argamassas para sistemas de pavimento radiante

5.1. Desenvolvimento e caracterização de argamassas

No presente capítulo são apresentados os resultados referentes ao desenvolvimento e caracterização de argamassas em estudo para pavimentos radiantes. Preliminarmente é detalhada a informação acerca da argamassa de referência que serviu de modelo para as seguintes melhorias. Depois apresenta-se e discute-se o efeito da introdução dos aditivos nas diversas formulações desenvolvidas, em particular, são neste capítulo apresentados os resultados da caracterização das argamassas concebidas, relativamente às suas características no estado fresco e no estado endurecido, resultantes da incorporação do resíduo denso (ASIC) e do material de mudança de fase (PCM).

5.1.1. Argamassa de referência

Como ponto de partida para as otimizações das formulações subsequentes, foi estabelecida a argamassa de referência com base nas informações fornecidas pela *Saint-Gobain Portugal, S.A.*, tendo a formulação base um teor de água de 9%, a qual foi preparada e caracterizada no estado fresco e no estado endurecido, com o propósito de servir de referência ao desenvolvimento. Nesse sentido, no Quadro 5.1 são apresentadas as características obtidas para a argamassa de referência.

Quadro 5.1 - Características da argamassa de referência (AR)

Espalhamento [mm]	100
Densidade aparente – estado fresco [kg/m ³]	1660
Densidade – estado endurecido [kg/m ³]	2029 ± 17.5
Módulo de elasticidade dinâmico [GPa]	26.0 ± 1.3
Resistência mecânica à flexão [MPa]	4.0 ± 0.1
Resistência mecânica à compressão [MPa]	19.4 ± 0.5
Coefficiente de capilaridade [-]	0.35 ± 0.10
Absorção de água [%]	6.59 ± 0.2
Condutibilidade térmica [W/m.K]	0.71 ± 0.05

Esta argamassa de referência utilizada para seguinte desenvolvimento e otimização caracteriza-se, segundo a norma EN 13813:2002 [61], como uma argamassa tipo E25 na classe de módulo de elasticidade e numa do tipo F4 e C16 em relação às classes de resistência mecânica à flexão e compressão, respetivamente.

Todos os parâmetros da caracterização da formulação irão servir de ponto de referência à otimização pretendida das restantes formulações efetuadas. De facto, com um teor de água de 9% a argamassa não garante níveis de trabalhabilidade ou escoamento aceitáveis para aplicação em sistemas de pavimento radiante, sendo sinal disso que, na mesa de espalhamento, o cone se desmoronava ao invés de se espalhar. Desse modo, nas posteriores formulações o teor de água terá de ser aumentado, bem como se terá de recorrer à utilização de adjuvantes, com vista a obter um espalhamento mais elevado sem elevar em demasia o teor de água.

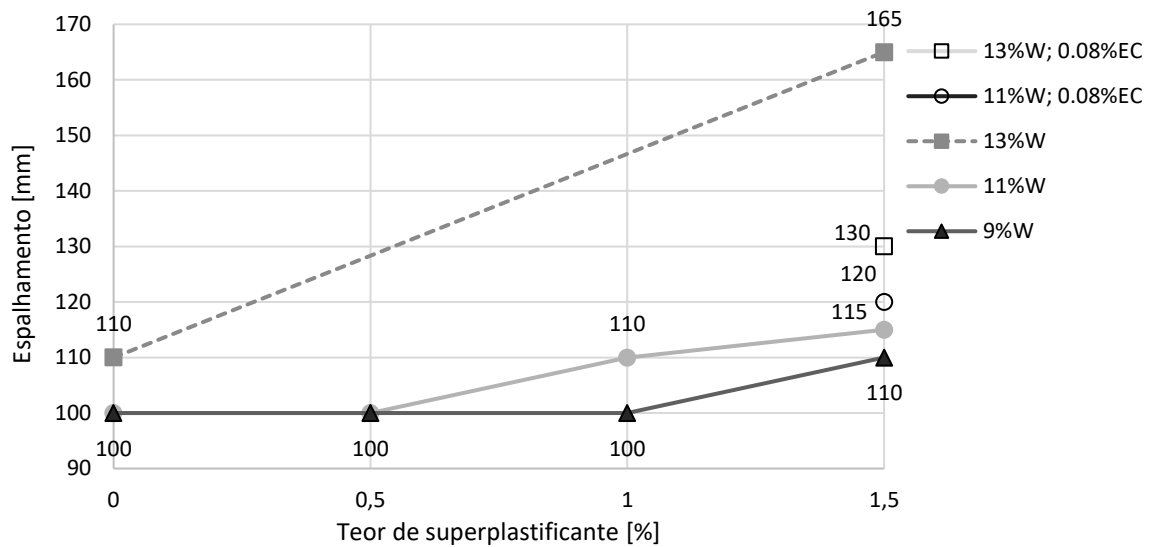
Com esse fim, foi realizado um estudo apenas no estado fresco da presente argamassa, de modo a obter um teor de água e de adjuvantes capazes de conferir ao material uma trabalhabilidade adequada, sem que ocorresse o fenómeno de exsudação e com o intuito de, futuramente, não sacrificar as propriedades mecânicas e térmicas.

Posto isto, foram incorporados diferentes teores de água, de agente redutor de água (superplastificante) e de agente retentor de água, uma vez que, sem a presença deste último componente, ocorriam fenómenos não desejados, como a exsudação e segregação dos materiais.

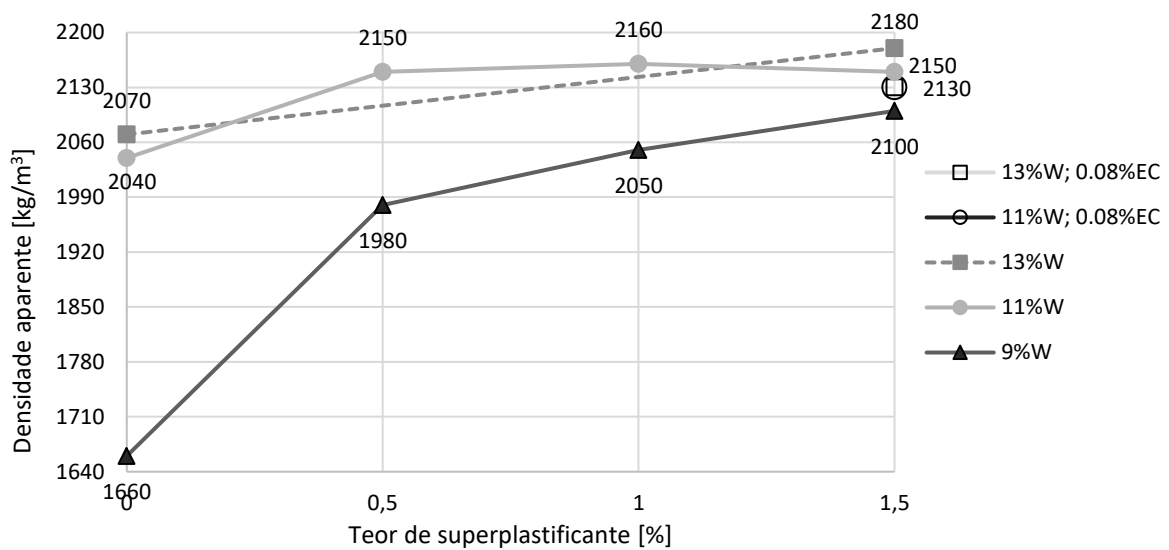
Na Figura 5.1 são apresentados os dados obtidos da consistência por espalhamento e da densidade aparente em fresco, para diferentes teores de água e adjuvantes, sendo SP a denominação do redutor de água (ou superplastificante) e o EC o do retentor de água (um éter de celulose). De notar que na Figura 5.1, apesar da linha que une os pontos referentes às argamassas com 13% de água ser linear, não traduz uma relação de linearidade entre os pontos, apenas não existem dados intermédios.

A formulação cujos teores de água, redutor e retentor de água eram, respetivamente, 13%, 1.5% e 0%, foi a que obteve uma maior consistência por espalhamento, ao mesmo tempo, foi esta a que atingiu um valor de densidade aparente mais elevado, no entanto, como ocorria o fenómeno de elevada exsudação, não foi validada para os trabalhos seguintes. Desta forma, foi necessário recorrer à introdução de um retentor de água tanto nesta

formulação como nas que o teor de água era de 11% e o teor de superplastificante era de 1,5%, uma vez que ocorreu exsudação em todas as referidas.



(a)



(b)

Figura 5.1 - Dados para diferentes teores de água e adjuvantes na argamassa de referência de: a) consistência por espalhamento; b) densidade aparente em estado fresco (os pontos 11%W; 0.08% EC e 13%W; 0.08% EC para 1.5% de superplastificante estão sobrepostos no valor 2130 kg/m³)

A adição de um teor de 0.08% de retentor de água eliminou qualquer efeito de exsudação, pelo que, para efeitos pretendidos, as formulações cuja combinação de resultados entre espalhamento e densidade se mostraram favoráveis foram as que se apresentam no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 - Teores de água e adjuvantes favoráveis à otimização das formulações

Teor de água [%]	Teor de SP [%]	Teor de EC [%]
11	1.5	0.08
13	0	0
13	1.5	0.08

5.1.2. Efeito da introdução de agregado denso nas argamassas

5.1.2.1. Análise do efeito do ASIC

Com vista ao objetivo proposto, procedeu-se à incorporação de um resíduo siderúrgico (ASIC) na argamassa de referência, em substituição parcial e/ou total da areia Eco-Chorro e do Calcário 1.5-3.0, em diferentes quantidades, resultando um dado teor de ASIC em cada formulação, que têm na sua constituição um teor de água base de 9%, tal como a referência.

Numa primeira fase, foram alvo de estudo as formulações das quais a substituição dos agregados médio e grosso pelo agregado siderúrgico ASIC foi realizada de forma progressiva, tendo a substituição sido feita simultaneamente sobre as areias Eco-Chorro e Calcário nas proporções de 50/50, 75/75 e 100/100, equivalendo, respetivamente, a um teor de incorporação de 25%, 37.5% e 50% de ASIC. Numa segunda fase de melhoria das formulações, estudou-se o efeito da adição do ASIC através da substituição total apenas da areia Eco-Chorro, mas mantendo o agregado calcário. Informação detalhada sobre as formulações desenvolvidas foi fornecida no Quadro 4.4.

Começando pela avaliação das argamassas em estado fresco, apresentam-se na Figura 5.2 a variação nos valores da consistência por espalhamento e da densidade aparente em função do teor de resíduo ASIC, para a mesma quantidade de água (9%).

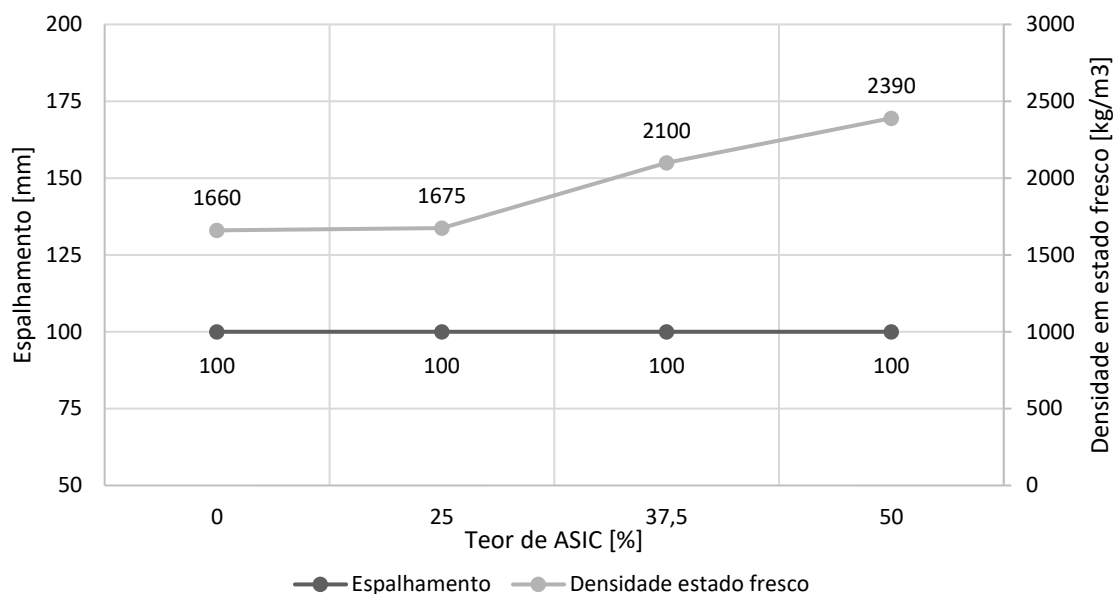


Figura 5.2 - Consistência por espalhamento e densidade em estado fresco em formulações com diferentes teores de ASIC

De facto, e como demonstrado no ponto 5.1.1, nenhuma argamassa desenvolvida tem uma trabalhabilidade adequada para o fim a que se propõe, ou seja, para a aplicação em sistemas de pavimento radiante onde se necessita claramente de uma maior fluidez. Por esse motivo, foi necessário aumentar o teor de água e colocar adjuvantes para que o espalhamento aumentasse. Por outro lado, verifica-se que a densidade aparente das misturas aumenta com o aumento do teor de ASIC, uma vez que se trata de um agregado mais denso. Uma vez que a densidade deste resíduo é superior à dos restantes materiais constituintes (ver 4.1.1), um aumento do teor do resíduo conduziu ao aumento da densidade da mistura, sendo tal facto também comprovado na sequência de outros estudos anteriores, nos quais também se demonstrou que as argamassas de densidade mais elevada são obtidas de acordo com o teor em que os agregados naturais são substituídos por escórias de aço mais densas [34, 35, 62].

Em relação às propriedades no estado endurecido, os ensaios foram realizados com vista à caracterização de cada mistura. O módulo de elasticidade dinâmico que mede a rigidez do material depende da densidade (Figura 5.3).

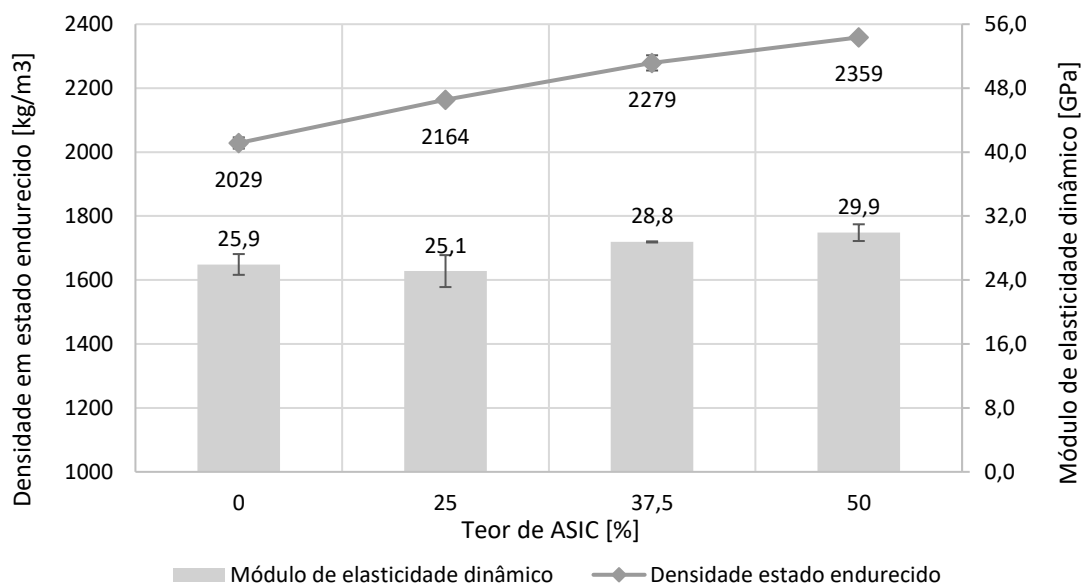


Figura 5.3 - Relação entre densidade aparente e módulo de elasticidade dinâmico das formulações, em função do teor de ASIC

Na mesma perspectiva do aumento da densidade aparente no estado fresco, a densidade no estado endurecido tem o mesmo comportamento, notando-se um aumento com o aumento do teor de incorporação de ASIC.

Comparando na Figura 5.3 o valor para a argamassa de referência e o da amostra A25ASIC, nota-se que o módulo de elasticidade se mantém aproximadamente constante apesar da densidade aumentar. Por outro lado, quando se aumenta o teor de ASIC, há um aumento da dureza interior do material, tendo um máximo aumento de 15%, quando se incorpora 50% de ASIC. Na sequência de um estudo anterior, revelou-se que devido à densidade do agregado siderúrgico ser maior do que a das areias e calcário, a velocidade de propagação de ultrassons aumenta e, conseqüentemente, aumenta o módulo de elasticidade dinâmico [63]. Segundo a EN 13813:2002 [61], a argamassa de referência, a que incorpora 25% e 37,5% de ASIC são classificadas como E25, sendo a que incorpora 50% da ASIC afeta à classe E30.

A menor porosidade de uma mistura e, correspondente densidade superior, reflete-se geralmente num aumento da resistência mecânica das argamassas. A Figura 5.4 apresenta a resistência mecânica à flexão e à compressão das argamassas de referência e das argamassas com incorporação de ASIC.

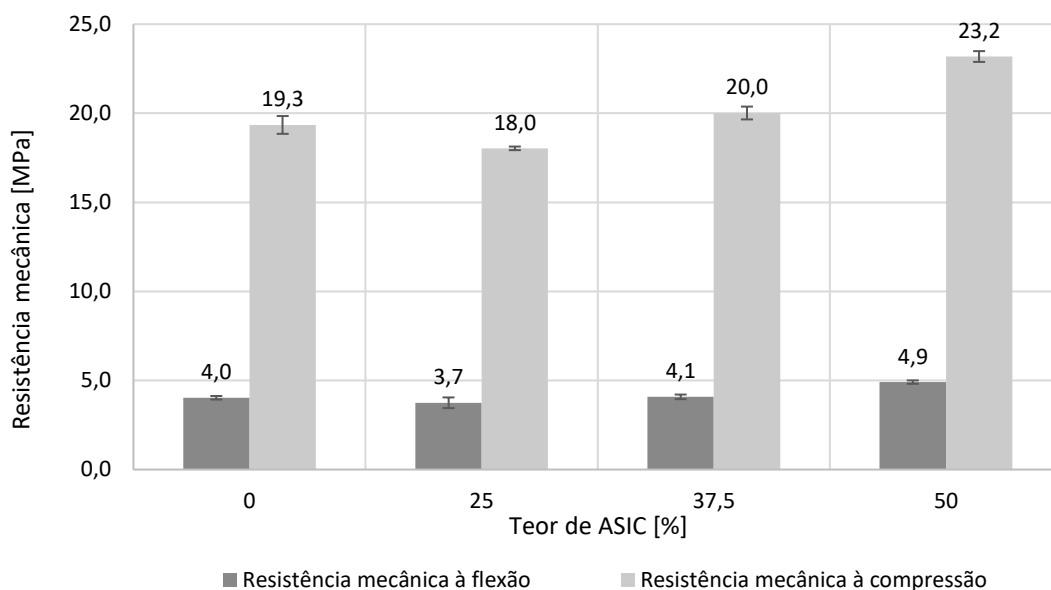


Figura 5.4 - Resistência mecânica à flexão e à compressão das argamassas

Pela análise da Figura 5.4, entre a argamassa de referência e a incorporação de 25% do resíduo siderúrgico ASIC, ocorre uma diminuição de resistência à flexão de 7% e na de resistência à compressão de 8%. Já nas amostras com 37.5% e 50% de ASIC verifica-se, em relação à referência, aumentos da resistência à flexão de 2.5% e 22.5%, respetivamente, e à compressão de 3.6% e 20.2%.

Em suma, a substituição total dos agregados naturais de granulometria média e grossa por agregado siderúrgico (ASIC) resulta num aumento bastante significativo na resistência mecânica. Além disso, com a exceção da amostra A25ASIC, houve uma clara tendência no aumento da resistência mecânica com o aumento do teor de agregado denso. O aumento generalizado da resistência pode ter origem na atividade pozolânica da fração mais fina do material siderúrgico que, reagindo quimicamente com o hidróxido de cálcio do clínquer, formando silicatos de cálcio hidratados com propriedades cimentícias que contribuem para o aumento da resistência dos materiais [36,62]. Em estudos recentes, a relação especificada anteriormente entre a incorporação de agregados densos e o aumento da resistência mecânica foi comprovada [37, 64].

Segundo a norma EN 13813:2002 [61], todas as argamassas desenvolvidas, na classe de resistência à flexão, são classificadas como F4, com a exceção da argamassa A50ASIC classificadas como uma F5. Já na classe de resistência à compressão, a argamassa de

referência e a que contém 25% de ASIC atingem a classe de resistência C16 e as restantes argamassas classificam-se como C20.

O coeficiente de absorção de água por capilaridade representa a velocidade a que um dado material tem capacidade de absorver água e relaciona-se com a natureza, quantidade e dimensão média dos poros do provete. Assim, um provete cujos poros sejam de dimensão capilar absorvem a água mais rapidamente, assim como os provetes com maior porosidade aberta.

Por outro lado, a absorção de água representa o valor absoluto de absorção de um provete, no específico caso, avalia a massa de água, em percentagem, que um provete é capaz de absorver durante 24 horas (Figura 5.5).

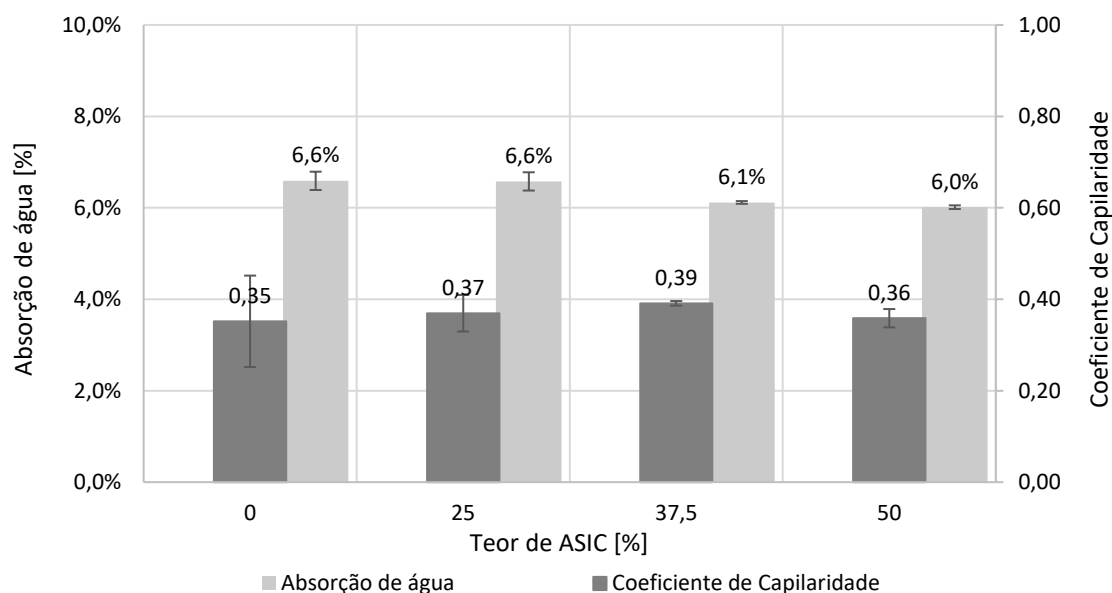


Figura 5.5 - Absorção de água e coeficiente de capilaridade das argamassas, em função do teor de ASIC

Em relação ao coeficiente de capilaridade, os resultados não apresentam variações muito acentuadas, no entanto, verifica-se que a amostra A37.5ASIC é a que é capaz de absorver água mais rapidamente. Pelo contrário, é a amostra sem agregado siderúrgico (a referência) que apresenta a menor velocidade de absorção de água.

Apesar da variação ser insignificante entre amostras, os resultados apresentados indicam que, para o mesmo período de tempo, a capacidade de absorver uma dada quantidade de água parece diminuir ligeiramente com o aumento do teor de ASIC.

Numa segunda fase de melhoria da argamassa em estudo, tentou-se ainda perceber o efeito da introdução do ASIC por substituição de apenas um dos agregados (Eco-Chorreio) mas deixando na formulação o agregado mais grosso (Calcário 1.5-3.0). O teor de substituição testado foi um intermédio (35%) da gama anteriormente estudada (25%-50%). Assim, foi desenvolvida uma formulação denominada por A35ASIC, a qual tem, na sua constituição, 15% de cimento, 35% de areia S50, 15% de calcário e 35% de ASIC.

Assim, os resultados dos ensaios de avaliação e caracterização da formulação A35ASIC no estado fresco e endurecido, são mostrados de seguida em paralelo com os resultados de referência e de uma amostra do grupo anterior (A50ASIC), onde também se substituiu a areia de Eco-Chorreio integralmente mas a par com o agregado mais grosso, o calcário. Em estado fresco foi avaliada a consistência por espalhamento e a densidade aparente (Quadro 5.3) e em estado endurecido foi avaliada a densidade, módulo de elasticidade dinâmico, resistência mecânica e absorção de água (Quadro 5.4).

Quadro 5.3 - Consistência por espalhamento e densidade em estado fresco das formulações AR, A35ASIC e A50ASIC

Formulação	AR	A35ASIC	A50ASIC
Espalhamento [mm]	100	100	100
Densidade em estado fresco [kg/m ³]	1660	1792	2390

No Quadro 5.3 é perceptível que a manutenção do agregado calcário na formulação A35ASIC causa um aumento do valor da densidade no estado fresco comparativamente à argamassa de referência, devido à presença de ASIC na formulação A35ASIC, e uma diminuição do valor de densidade no estado fresco desta argamassa comparativamente à argamassa com 50% de ASIC.

5. Estudo de argamassas para sistemas de pavimento radiante

Quadro 5.4 - Propriedades em estado endurecido das formulações AR, A35ASIC e A50ASIC

Formulação	AR	A35ASIC	A50ASIC
Densidade [kg/m ³]	2029 ± 17.5	2325 ± 10.7	2359 ± 8.8
Módulo de elasticidade dinâmico [GPa]	25.9 ± 1.3	30.2 ± 1.9	29.9 ± 1.0
Resistência mecânica à flexão [MPa]	4.0 ± 0.1	5.8 ± 0.1	4.9 ± 0.1
Resistência mecânica à compressão [MPa]	19.3 ± 0.5	26.6 ± 1.0	23.2 ± 0.3
Absorção de água	6.6% ± 0.20%	5.6% ± 0.10%	6.0% ± 0.04%
Coefficiente de capilaridade	0.35 ± 0.10	0.34 ± 0.02	0.36 ± 0.02

No estado endurecido, a densidade das argamassas aumenta com o aumento do teor de ASIC e o módulo de elasticidade da argamassa A35ASIC não sofre grande variação comparando com as anteriores argamassas (Quadro 5.4). Segundo a norma EN 13813:2002 [61], em relação ao módulo de elasticidade dinâmico, a formulação A35ASIC é classificada em E30.

Em termos de resistência mecânica (Quadro 5.4), constatou-se que a introdução de ASIC (35%) mas mantendo o agregado calcário na mistura, teve até um efeito ligeiramente benéfico nos valores da resistência pois, quando comparado com uma formulação com mais ASIC (50%) mas sem o agregado calcário a resistência não diminuiu mas teve até um ligeiro aumento.

Segundo a EN 13813:2002 [61], a argamassa A35ASIC é classificada como F6 na classe de resistência à flexão e como C25 na classe de resistência à compressão, enquanto a AR e a A35ASIC se classificam como F4 e F5 e como C16 e C20, respetivamente.

Por fim, foi avaliada a capilaridade das argamassas e a sua absorção de água durante 24 horas (Quadro 5.4), e pode-se dizer que aqui as diferenças também não foram significativas, o que nos indicia que esta substituição mantendo o agregado calcário se apresenta como uma boa alternativa que merecerá a atenção posterior dos testes sobre o desempenho térmico.

Resumindo, segundo a análise sobre o efeito da incorporação do ASIC, pode-se dizer que é tecnicamente viável a introdução deste resíduo siderúrgico como matéria prima alternativa aos agregados naturais usados na formulação base, tendo-se mesmo atingido valores de densidade e de resistência mecânica superiores na gama de incorporação

testada, o que indicia uma boa expectativa para o aumento da condutibilidade térmica destas argamassas, característica cujo ensaio será apresentado e discutido mais à frente. Verifica-se também que o nível de consistência ou fluidez no estado fresco é insuficiente para a aplicação na envoltória do sistema de pavimento radiante. Este aspeto é abordado de seguida em termos das alternativas estudadas para estas formulações.

5.1.2.2. Efeito da adição de água e adjuvantes

Uma vez que nenhuma das formulações de argamassa desenvolvidas apresentavam uma consistência por espalhamento adequada à aplicação no sistema de pavimento radiante, que requer uma maior fluidez no espalhamento, foi necessária a realização de ajustes recorrendo à introdução de água e adjuvantes nas formulações anteriores. De notar que, para simplificação de nomenclaturas, o redutor de água ou superplastificante é denominado por SP e o retentor de água é denominado por EC, uma vez que a sua base é um éter de celulose. Nesse sentido, como apresentado na Figura 5.1, foram selecionadas as melhores formulações com base na argamassa de referência (Quadro 5.2), tendo em atenção os resultados das caracterizações anteriormente realizadas, o que resultou na seleção das amostras A35ASIC, A37.5ASIC e A50ASIC para o estudo do efeito da adição de água e adjuvantes. Partindo do teor base de água (9%) usado nas formulações base e com ASIC anteriores, aumentou-se nestas formulações este teor de água para 11% e 13% e, ao mesmo tempo, introduziu-se 1.5%SP e 0.08%EC nas formulações com estes teores de água acrescidos.

Na Figura 5.6 é apresentada a consistência por espalhamento de todas as estas formulações, sendo que esta aumentou quando se aumentou o teor de água e adjuvantes. Desta forma há que assinalar que foi possível em todos os teores de ASIC duplicar o nível de espalhamento conseguido nestas formulações.

Focando agora no estado endurecido das misturas, foi determinada a densidade das argamassas em alvo de estudo, cujos resultados são apresentados na Figura 5.7. Foi possível com este aumento extraordinário de fluidez através do uso combinado de adjuvantes manter as densidades no estado endurecido destas formulações com diferentes teores de ASIC em valores entre os 2200-2400 kg/m³, bem acima do valor da formulação base.

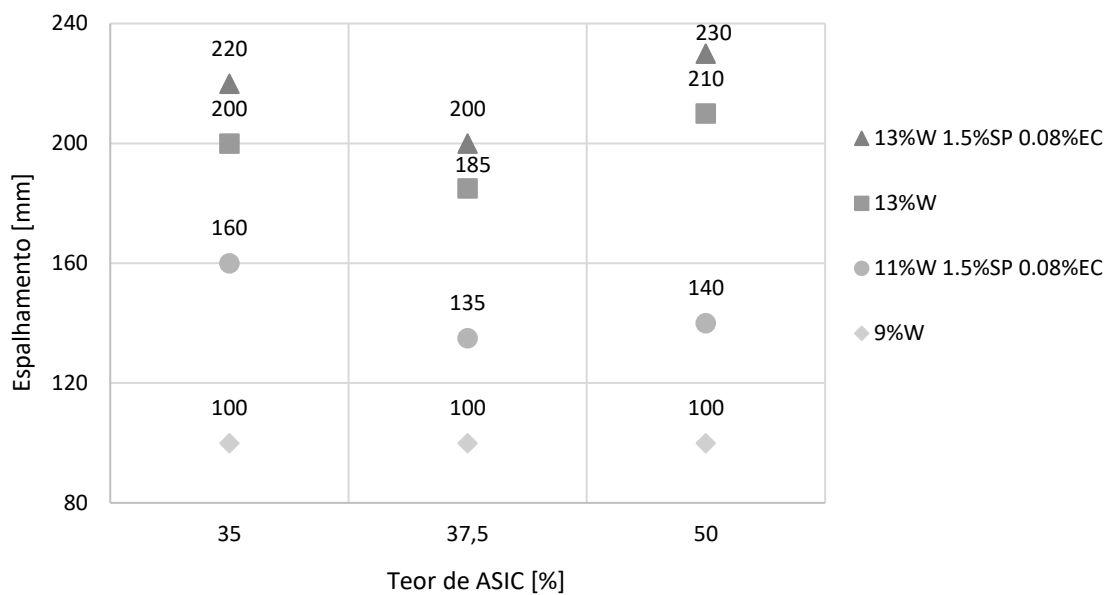


Figura 5.6 - Consistência por espalhamento das argamassas com adição de água e adjuvantes

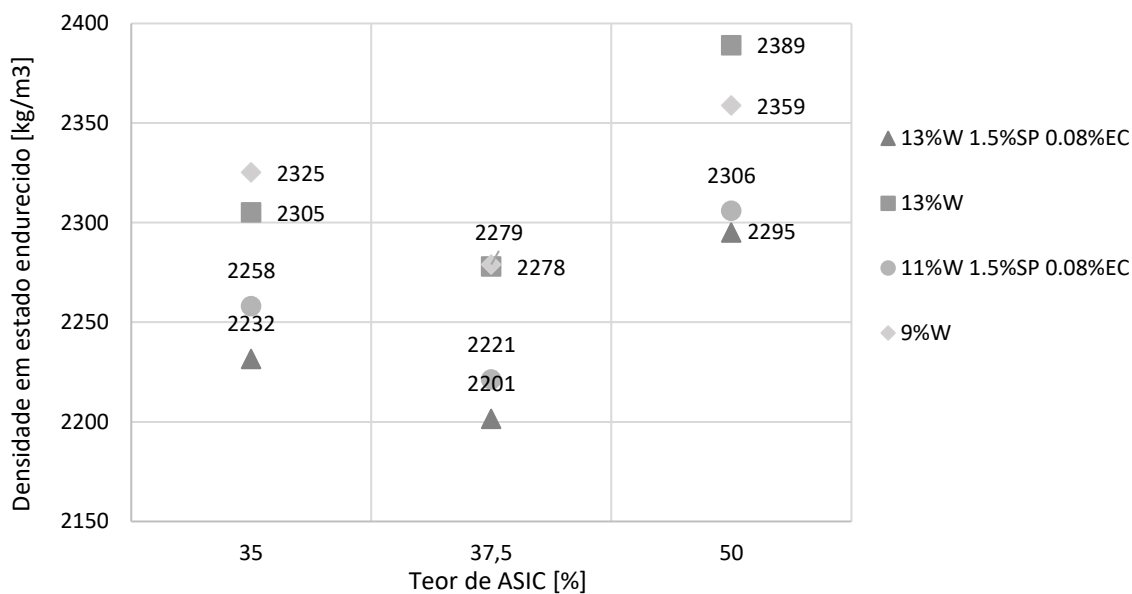


Figura 5.7 – Densidade em estado endurecido das argamassas com adição de água e adjuvantes

O efeito da adição de água e adjuvantes no módulo de elasticidade dinâmico, representado na Figura 5.8, tem um comportamento semelhante ao efeito explicitado para a densidade.

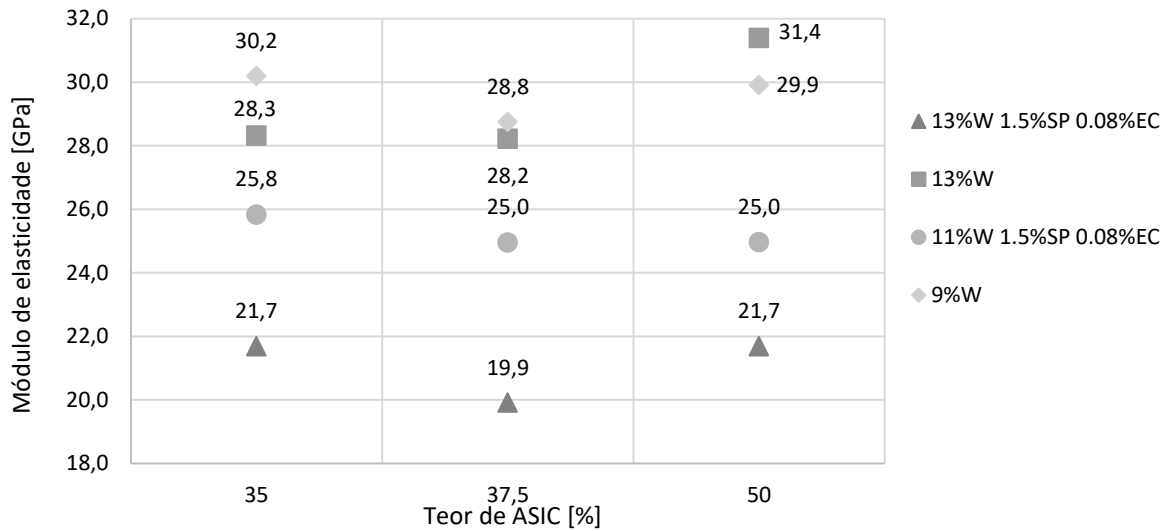
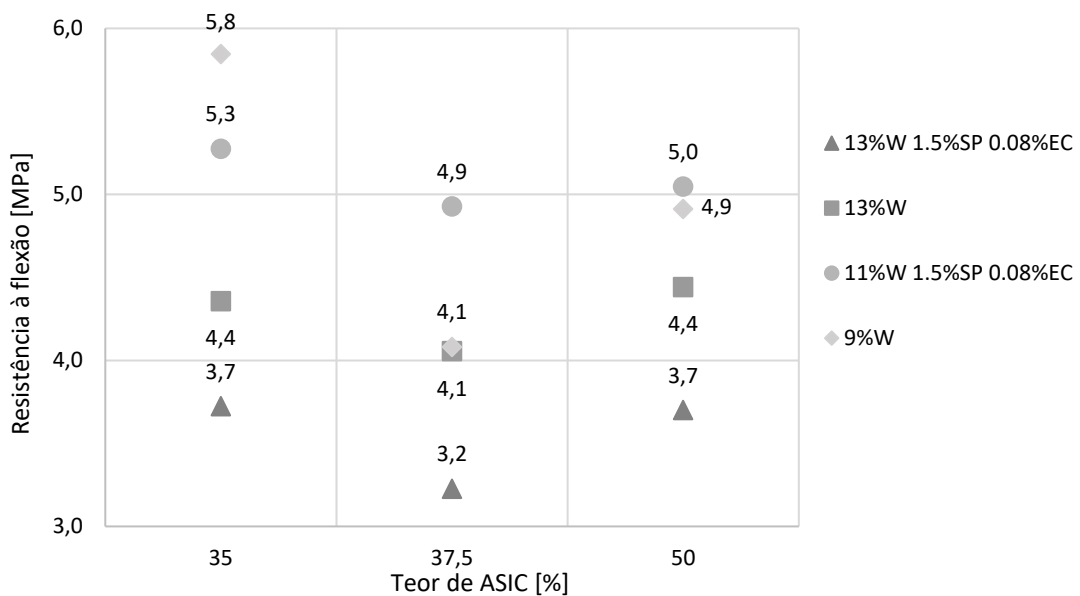


Figura 5.8 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com adição de água e adjuvantes

Relativamente à resistência mecânica, na Figura 5.9 são apresentadas as resistências à flexão e à compressão, verificando-se que se conseguiu manter os valores de resistência sem degradação face ao significativo e necessário aumento de fluidez. Desta forma estas argamassas podem constituir-se como formulações interessantes para estudo do seu desempenho térmico ao mesmo tempo que se tornaram adequadas para o espalhamento exigido numa aplicação de envolvimento nos sistemas de pavimento radiante.



(a)

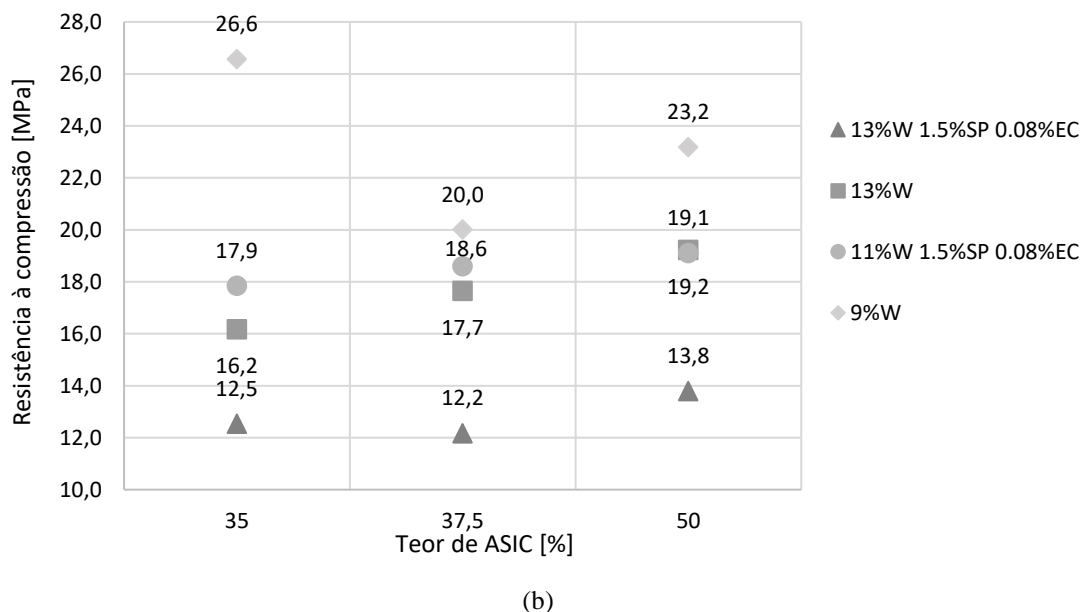


Figura 5.9 – Resistência mecânica das argamassas com adição de água e adjuvantes: a) Resistência mecânica à flexão; b) Resistência mecânica à compressão

5.1.2.3. Avaliação da condutibilidade térmica

De modo a estudar o comportamento das argamassas em relação ao seu desempenho térmico, foram realizados ensaios de condutibilidade térmica sobre algumas das formulações anteriormente desenvolvidas e consideradas interessantes em termos de potenciar a transmissão térmica (Quadro 5.5).

Quadro 5.5 - Formulações selecionadas para ensaio da condutividade térmica

Formulação	Teor de água [%]	Teor de SP [%]	Teor de EC [%]
AR	9	0	0
A35ASIC	9	0	0
A35ASIC	11	1.5	0.08
A35ASIC	13	0	0
A50ASIC	9	0	0
A50ASIC	11	1.5	0.08
A50ASIC	13	0	0

Esta seleção teve em consideração uma futura aplicação em sistemas de pavimento radiante, no qual se pretende uma boa trabalhabilidade mas também uma densidade elevada, sinónimo de uma argamassa menos porosa e, portanto, com maior

condutibilidade térmica e, por fim, que fosse capaz de suportar as cargas a que um pavimento, normalmente, está sujeito. Assim, as argamassas selecionadas e respetivos teores de água e adjuvantes são apresentadas no Quadro 5.6. Os resultados dos ensaios de condutibilidade térmica para cada uma das formulações desenvolvidas são apresentados na Figura 5.10.

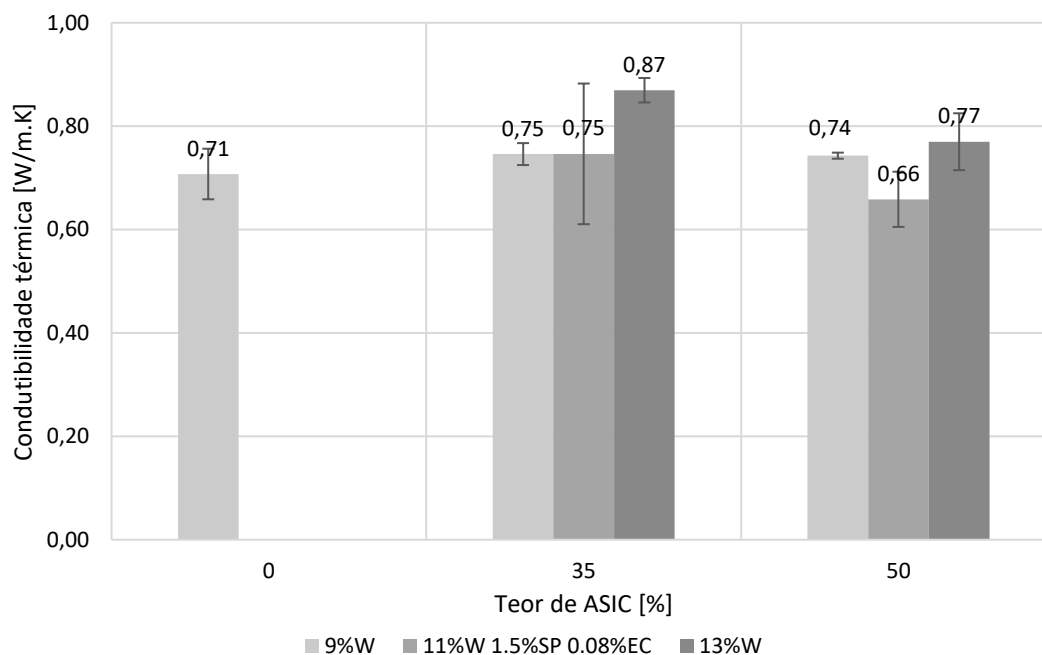


Figura 5.10 - Condutibilidade térmica das argamassas

Da Figura 5.10, é possível aferir que, nas argamassas base com teor de água de 9%, o aumento do teor de ASIC provocou um ligeiro aumento do coeficiente de condutibilidade térmica justificado pelo aumento de densidade no estado endurecido das composições. Por outro lado, quando se aumentou o teor de água e se incorporou os adjuvantes, foi possível manter o valor da condutibilidade térmica e aumentar a fluidez no estado fresco, essencial para aplicações no pavimento radiante. A densidade e a porosidade da matriz afetam significativamente a condutibilidade térmica das argamassas e a incorporação de maiores percentagens de ASIC levaram a um aumento da densidade das amostras. No entanto, os aumentos de densidade provocados pelo aumento do teor de ASIC não se traduzem obrigatoriamente num aumento de condutibilidade térmica, uma vez que conduzem a um aumento da porosidade da matriz criada por dificuldades de empacotamento e consequente diminuição desta propriedade.

5.1.3. Efeito do material de mudança de fase nas argamassas

Numa outra abordagem para aumentar o armazenamento energético e sua transmissão, desenvolveu-se um estudo sobre como obter uma argamassa para pisos radiantes com maior capacidade de calor latente, tornando-a mais favorável à economia de energia no funcionamento deste tipo de sistemas radiantes. Foi assim avaliada a incorporação de um material de mudança de fase (PCM) nas formulações anteriormente desenvolvidas. O PCM foi colocado nas formulações selecionadas em substituição da areia fina (filler areia S50). Partindo das formulações sobre as quais se estudou o efeito da adição de água e adjuvantes, selecionaram-se as duas mais favoráveis na relação de consistência, densidade aparente e resistência mecânica e nelas foi adicionado um teor de 20% dos dois tipos de PCM usados, uma vez que foi este o teor que se mostrou mais favorável em termos de incorporação num conjunto de estudos recentes [46, 65, 66, 67]. As formulações com incorporação conjunta de ASIC e PCM para avaliação da sua viabilidade apresentam-se no Quadro 5.6.

Quadro 5.6 - Formulações com ASIC e PCM simultaneamente

Denominação	Cimento [%]	Areia S50 [%]	Calcário [%]	ASIC [%]	PCM [%]	Água [%]	SP [%]	EC [%]
A35ASIC_ref	15	35	15	35	0	13	1.5	0.08
A35A20PM	15	15	15	35	20	22	1.5	0
A35A20PC	15	15	15	35	20	22	1.0	0
A50ASIC_ref	15	35	0	50	0	13	1.5	0.08
A50A20PM	15	15	0	50	20	22	1.5	0
A50A20PC	15	15	0	50	20	22	1.0	0

(nota: PM e PC significa PCM Micronal® e PCM CrodaTherm™, respetivamente)

Em primeiro lugar foram avaliadas e caracterizadas as formulações com incorporação do PCM Micronal®. Para isso, foram realizados ensaios de modo a obter um teor de água e adjuvantes que fornecessem às misturas uma densidade aparente em estado fresco o mais elevada possível, sem afetar a consistência por espalhamento. Desse modo, necessitou-se para as formulações A35A20PM e A50A20PM de um teor de água de 22% e de um teor de superplastificante de 1.5%. Nestas misturas não foi necessário recorrer à adição de um

retentor de água, uma vez que não ocorreu o fenómeno de exsudação. De notar que o teor de água é mais elevado que as formulações anteriormente desenvolvidas devido ao PCM ter partículas muito finas, o que faz com que necessite de mais água de molhagem para envolver todas as partículas, uma vez que a área superficial é maior.

A incorporação do PCM CrodaTherm™ resultou nas argamassas A35A20PC e A50A20PC. Nestas formulações, para se obter o mesmo espalhamento das anteriores, foi acertado o teor de água e do agente redutor de água necessário, sendo, respetivamente 22% e 1%. Como este PCM tem menor afinidade com a água e as partículas são mais aglomeradas, a área superficial para molhagem é menor, logo foi necessário um menor teor de superplastificante (1%) de modo a se obter o mesmo espalhamento das formulações anteriores.

Posto isto, são apresentados de seguida os resultados referentes às quatro formulações desenvolvidas: A35A20PM, A50A20PM, A35A20PC e A50A20PC. No Quadro 5.8 apresenta-se a avaliação das formulações em estado fresco, nomeadamente a consistência por espalhamento e a densidade aparente (Quadro 5.7).

Quadro 5.7 - Espalhamento e densidade aparente no estado fresco das argamassas com incorporação de ASIC e PCM

Formulação	A35ASIC_ref	A35A20PM	A35A20PC	A50ASIC_ref	A50A20PM	A50A20PC
Espalhamento [mm]	220	190	190	230	190	190
Densidade [kg/m ³]	2360	1750	1760	2430	1830	1860

Assim como na densidade aparente em estado fresco, a densidade no estado endurecido nas amostras de PCM CrodaTherm™ apresentam valores mais elevados, como se observa na Figura 5.11.

Com base nos dados dos fabricantes dos dois materiais de mudança de fase (Quadro 4.1), a densidade do PCM microencapsulado é muito menor que a densidade dos agregados naturais e siderúrgico, pelo que a densidade relativa das argamassas com adição de PCM microencapsulado diminui sempre em relação às amostras sem este aditivo. A densidade das amostras com PCM CrodaTherm™ são cerca de 3% a 4% superiores que as amostras

5. Estudo de argamassas para sistemas de pavimento radiante

com PCM Micronal®. Já em relação às amostras de referência, para as argamassas com 35% e 50% de ASIC, respetivamente, as formulações com PCM Micronal® são 23% e 29% inferiores à referência, já do PCM CrodaTherm™, a diferença atinge os 26% para as duas formulações.

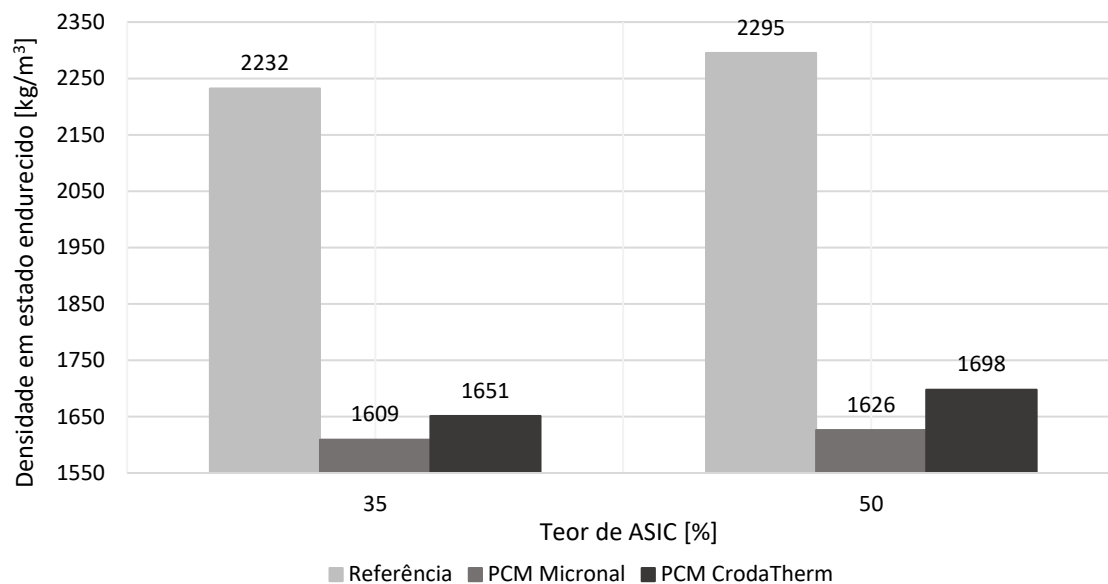


Figura 5.11 – Densidade no estado endurecido das argamassas com incorporação de ASIC e PCM

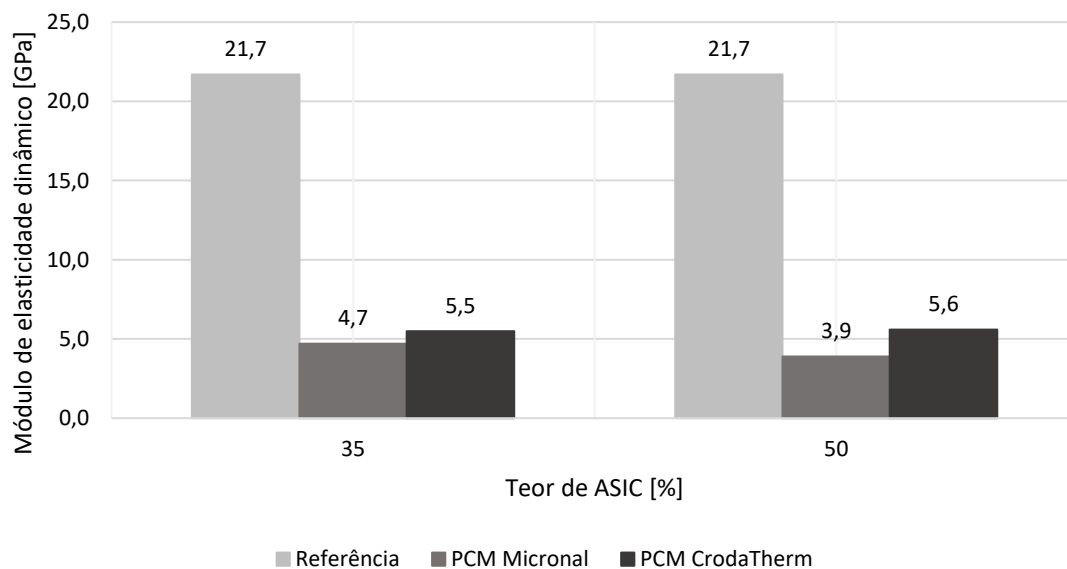


Figura 5.12 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com incorporação de ASIC e PCM

Já em relação ao módulo de elasticidade dinâmico, observa-se pela Figura 5.12 que as argamassas com ASIC e PCM CrodaTherm™ é ligeiramente mais rígido do que as mesmas composições de argamassa com o outro PCM. Por outro lado, a incorporação de ambos os PCM em relação às respetivas referências (sem PCM), promovem uma significativa diminuição da rigidez da argamassa. De facto, a rigidez da argamassa de referência com 35% de ASIC tem 75% a 78% de rigidez superior do que as argamassas com PCM CrodaTherm™ e Micronal®, respetivamente, enquanto no caso da argamassa de referência com 50% de ASIC apresenta 74% ou 82% de rigidez superior com PCM CrodaTherm™ e Micronal®. Segundo a norma EN 13813:2002 [61], contemplando apenas as argamassas com incorporação de PCM, a argamassa com menor módulo de elasticidade é classificada como E2 e às restantes argamassas são atribuídas à classe de módulo de elasticidade E5.

No que diz respeito à resistência mecânica das argamassas com ASIC e incorporação de material de mudança de fase, verificou-se que as formulações com PCM Micronal® são ligeiramente mais resistente à flexão e à compressão em comparação com as formulações com o outro PCM utilizado (Figura 5.13).

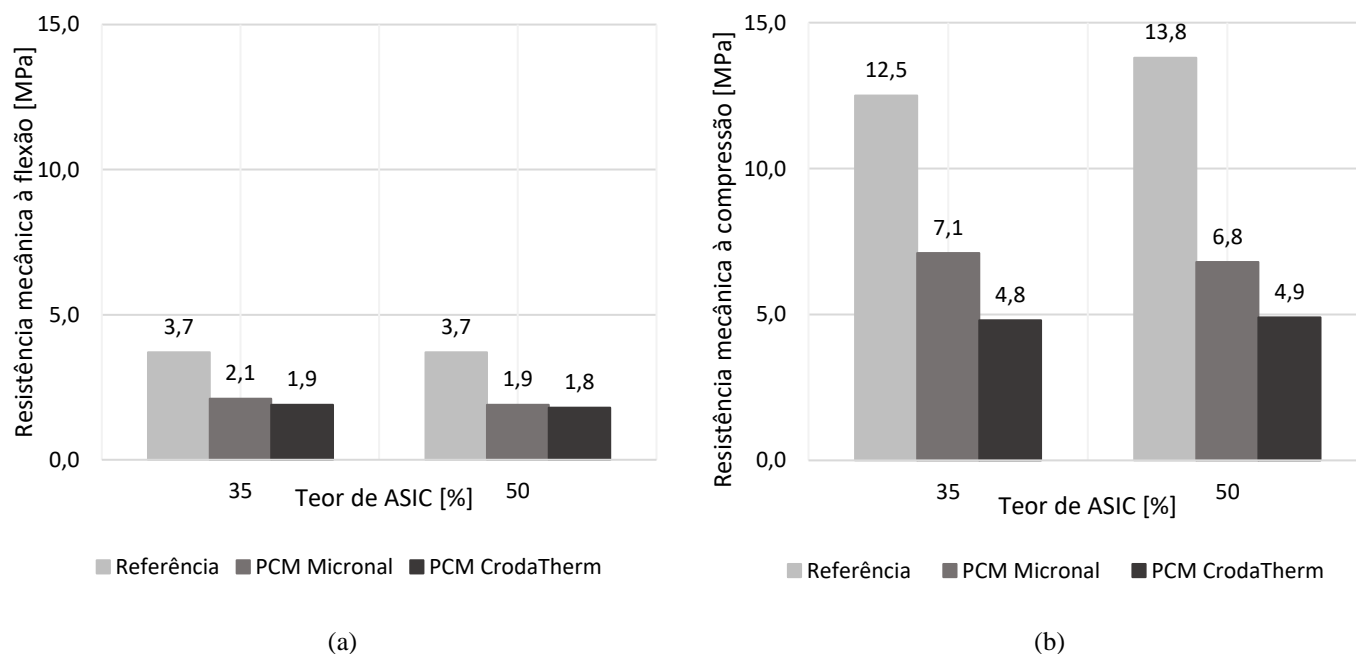


Figura 5.13 – Resistência mecânica das argamassas com incorporação de ASIC e PCM: a) Resistência mecânica à flexão; b) Resistência mecânica à compressão

Todavia o aspecto mais relevante é que, tanto a resistência mecânica à flexão como à compressão, diminuem significativamente com a incorporação de qualquer dos PCM utilizados, comparativamente às respectivas formulações de referência.. Na verdade a presença deste material, para além de diminuir a densidade, pode dificultar a hidratação das argamassas e, conseqüentemente, ambas as ações reduzem a resistência mecânica, existindo uma relação direta entre maiores teores de PCM e diminuição de resistência mais acentuada [68]. Além disto, as argamassas com incorporação de PCM, como supramencionado, contêm teores de água bastante elevados em comparação à misturas sem este constituinte, pelo que o aumento da água, com o conseqüente aumento de porosidade, origina uma menor adesão entre as microcápsulas de PCM e a matriz cimentícia, contribuindo também para a diminuição drástica da resistência mecânica [46]. Outros autores obtiveram resultados análogos em relação à incorporação de PCMs em argamassas para outras aplicações [40, 69, 70].

Estes resultados sobre as argamassas desenvolvidas indicam que, segundo a EN 13813:2002 [61], elas se inserem numa classe de resistência mecânica à flexão F2, enquanto, as argamassas com PCM Micronal® inserem-se na classe de resistência à compressão C7 e as que incorporam PCM CrodaTherm™ estão inseridas na classe C5.

5.2. Simulação numérica de sistemas de pavimento radiante com argamassas otimizadas

São apresentados aqui os resultados referentes à simulação numérica de um pavimento radiante com as melhores formulações das argamassas estudadas e, por essa razão, selecionadas para esta avaliação numérica do desempenho térmico das mesmas quando aplicadas nestes sistemas. As argamassas utilizadas para camada de enchimento do pavimento radiante foram a argamassa de referência sem adição de agregado denso (AR) e as duas formulações cujo valor de condutibilidade térmica resultante fosse mais elevado, a argamassa A35ASIC com 13% de água e a A50ASIC com 13% de água.

No presente caso, foram escolhidos nós do modelo na camada da argamassa para calcular um perfil de temperatura vertical, imediatamente acima da tubagem até à superfície do pavimento. Observa-se na Figura 5.14 o perfil da temperatura média após 6 horas de

funcionamento do sistema, cuja temperatura da água se encontra estabilizada a 45°C (Figura 5.14).

A argamassa de referência (AR) que não incorpora agregado denso é a que representa um perfil de temperatura média mais baixo. A argamassa A35ASIC que tem um valor de condutibilidade térmica mais elevado, resulta num perfil de temperatura média ligeiramente superior. Na Figura 5.15 é apresentado um perfil da temperatura à superfície do pavimento para as diferentes formulações de argamassa até às 6 horas de aquecimento verificando uma evolução da taxa de aquecimento ligeiramente superior para as argamassas com incorporação de agregado denso que tem maior condutibilidade térmica.

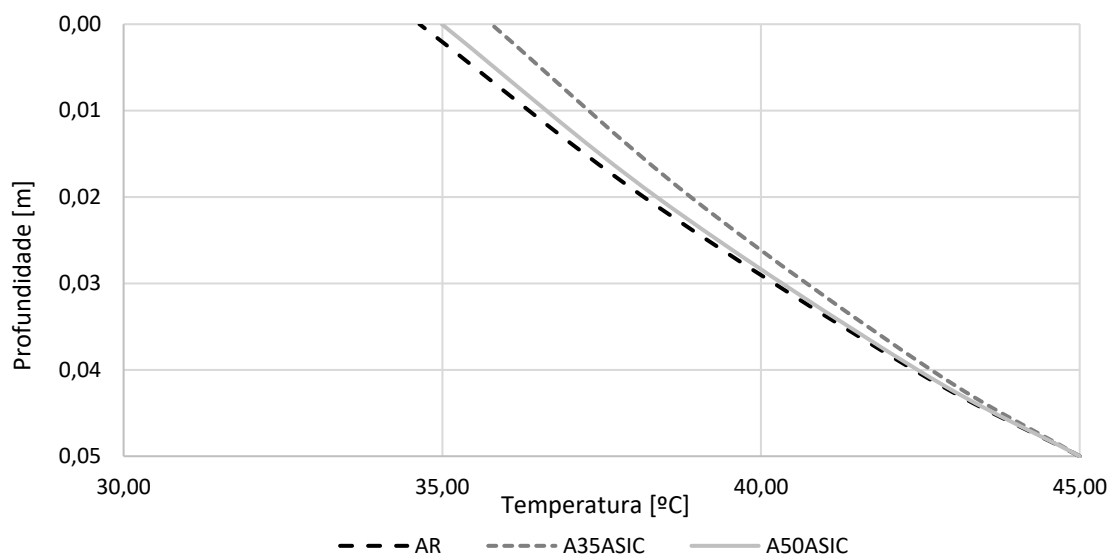


Figura 5.14 - Perfil da temperatura média em função da distância à tubagem, em 6 horas de funcionamento do sistema

Nota: A cota 0 m corresponde à superfície da camada de enchimento e a cota 0.05 m corresponde ao ponto imediatamente acima da tubagem.

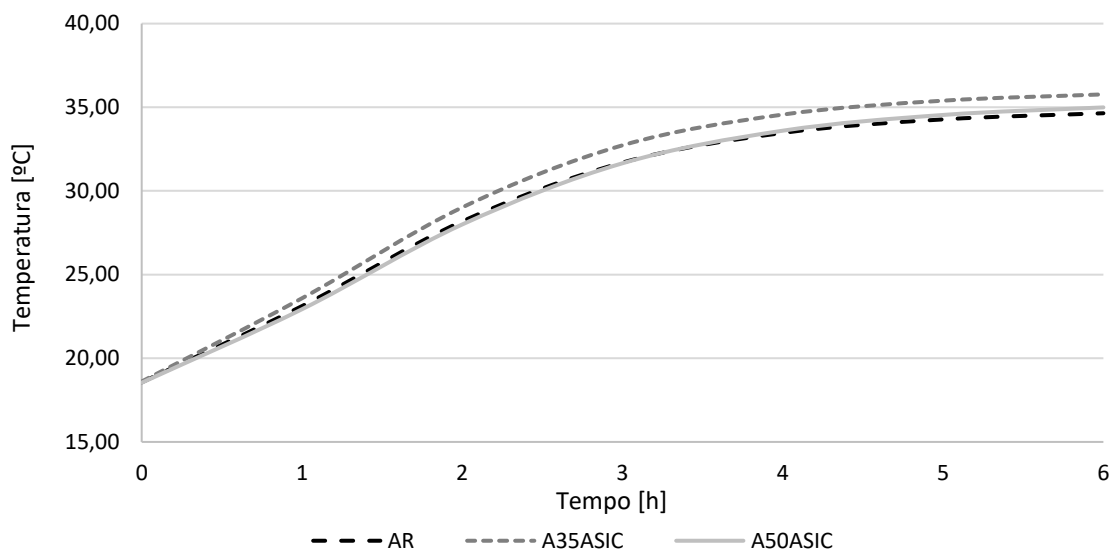


Figura 5.15 - Perfil da temperatura à superfície do pavimento para diferentes camadas de enchimento

Os resultados obtidos mostram que a incorporação de agregado siderúrgico na camada de argamassa, nomeadamente da A35ASIC, resulta numa taxa de aquecimento maior da temperatura à superfície e, desse modo, afeta positivamente a eficiência dos sistemas de pavimento radiante. Em análise à Figura 5.15, afere-se que a argamassa com condutibilidade térmica mais elevada, resulta consequentemente numa transferência de temperatura até à superfície da laje mais elevada. A temperatura máxima atingida pelo sistema de pavimento radiante no valor de 35,77°C ocorreu com a argamassa A35ASIC_13W. Já para a argamassa de referência e para a argamassa A50ASIC_13W, as temperaturas máximas atingidas à superfície foram, respetivamente, 34,64°C e 34,99°C.

Como referido, a argamassa com 35% de agregado siderúrgico e 13% de água na sua constituição foi a que apresenta maiores temperaturas à superfície durante todo o período de aquecimento (6 horas) e, consequentemente, na eficiência dos pavimentos, na medida em que poderá conduzir a um menor tempo de operação e consumo reduzido de energia. Refira-se que, no caso da camada de enchimento ser constituído por uma argamassa de referência e argamassa com 50% deste agregado denso, os resultados revelam que a taxa de aquecimento e temperaturas máximas até às 3 horas de funcionamento é semelhante, e apenas após este tempo de aquecimento e quando a temperatura da água já está a 45°C, a argamassa com 50% de ASIC apresenta maiores temperaturas à superfície do que a

argamassa de referência, no entanto esta diferença é pouco significativa em relação à outra formulação de argamassa (35% de ASIC).

As Figuras 5.16, 5.17 e 5.18 apresentam os resultados de distribuição de temperatura no modelo tridimensional do pavimento radiante e ainda a distribuição de temperatura à superfície do pavimento, respetivamente para as argamassas AR, A35ASIC_13W e A50ASIC_13W. Pela análise destas figuras, verifica-se um maior valor das temperaturas superficiais no caso dos modelos com argamassas que incorporam o agregado siderúrgico.

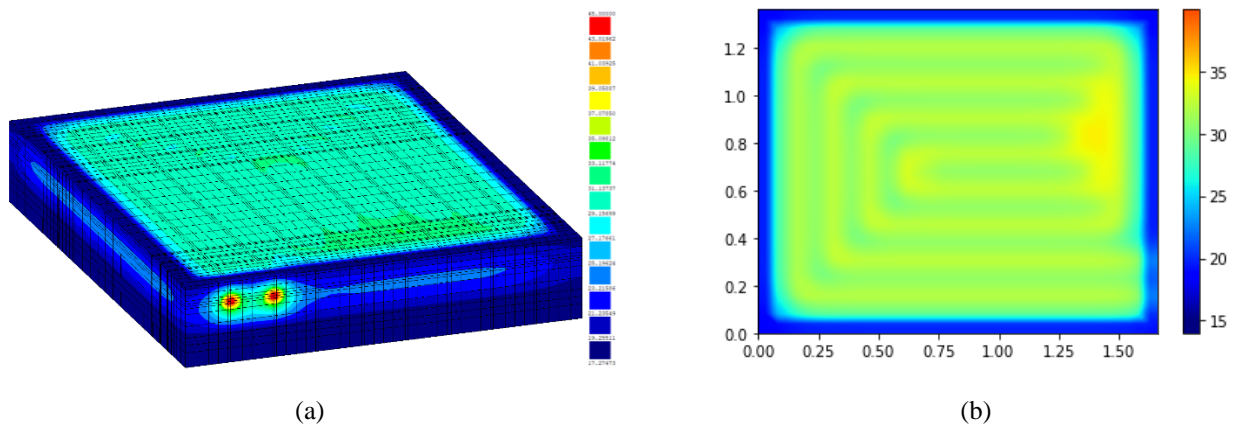


Figura 5.16 - Distribuição da temperatura no sistema de pavimento radiante simulado com argamassa de referência: (a) Modelo tridimensional; (b) Distribuição da temperatura à superfície

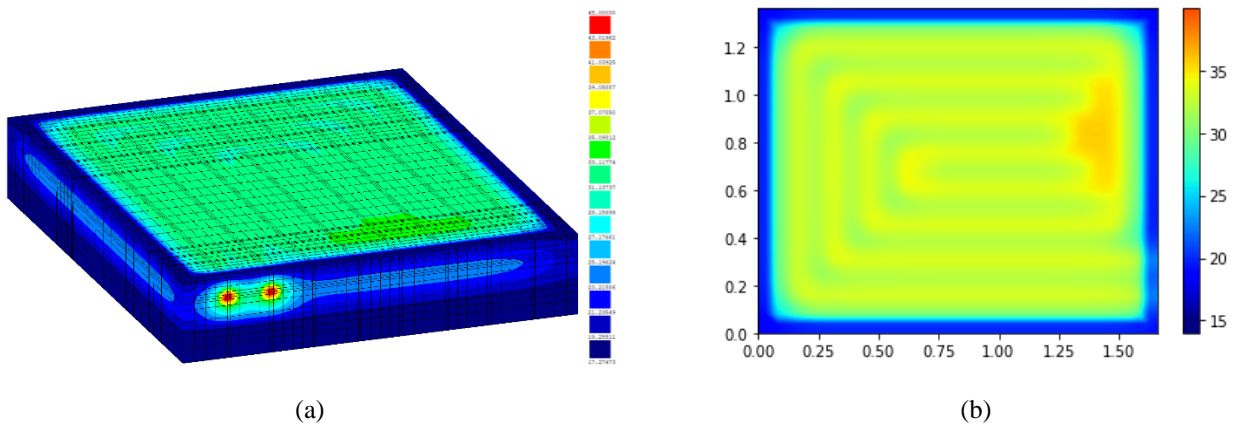


Figura 5.17 - Distribuição da temperatura no sistema de pavimento radiante simulado com argamassa A35ASIC_13W: (a) Modelo tridimensional; (b) Distribuição da temperatura à superfície

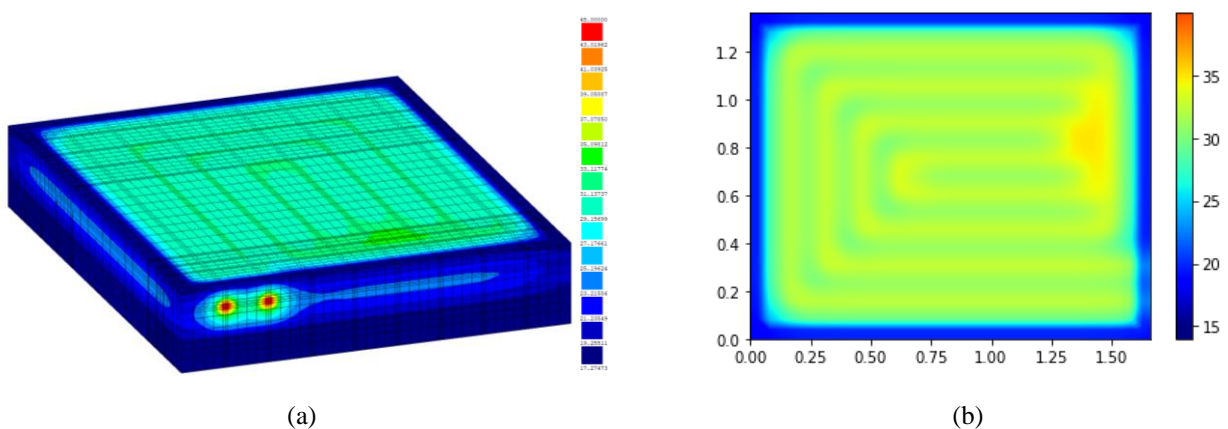


Figura 5.18 - Distribuição da temperatura no sistema de pavimento radiante simulado com argamassa A50ASIC_13W: (a) Modelo tridimensional; (b) Distribuição da temperatura à superfície

Capítulo 6

Conclusões

6. Conclusões

O principal objetivo deste estudo foi o desenvolvimento e caracterização de argamassas melhoradas com incorporação de um subproduto metalúrgico como agregado denso, de modo a conseguir obter argamassas com maior condutibilidade térmica para aplicação na camada de enchimento em sistemas de pavimento radiante. Pretendeu-se também estudar a incorporação de materiais de mudança de fase com o objetivo de aumentar, tal como no caso anterior, a capacidade de transferência de calor destas argamassas para diminuir o tempo de funcionamento dos sistemas energéticos de suporte.

Em relação ao desenvolvimento das argamassas com substituição parcial e total dos seus agregados naturais médio e grosso (areias Eco-Chorreio e Calcário) pelo ASIC, concluiu-se que, para um mesmo teor de água (9%), o aumento do teor de ASIC aumenta a densidade e a rigidez das argamassas. A absorção de água e o coeficiente de capilaridade não sofrem alterações significativas, embora apresentem uma ligeira tendência para diminuir. Consequentemente, estas argamassas apresentam resistências mecânicas superiores à argamassa de referência. No estado fresco, a consistência por espalhamento permanece constante. Analisando o efeito da substituição total do agregado médio (areia Eco-Chorreio) por ASIC, nota-se um aumento da densidade em relação à referência, apesar de não ser tão elevada quanto às formulações onde houve substituição total dos agregados médio e grosso (e consequentemente maior teor de ASIC). Em relação à rigidez da argamassa e à resistência mecânica, esta argamassa foi a que permitiu atingir um maior módulo de elasticidade dinâmico e resistência mecânica relativamente às restantes argamassas desenvolvidas. Deve-se salientar que, em relação à condutibilidade térmica destas argamassas com um teor de água de 9%, um aumento do ASIC traduz-se num aumento da condutibilidade térmica, devido ao aumento da densidade das misturas. Uma maior condutibilidade térmica das argamassas era um dos fatores que se procurava para que se viesse a obter uma maior transmissão térmica nos pavimentos radiantes.

Para se melhorar o escoamento da argamassa na aplicação sobre pavimentos radiantes, em que se requer um bom envolvimento das tubagens pelas argamassas, estudou-se o efeito da incorporação de adjuvantes em simultâneo com a alteração do teor de água nas formulações. A consistência por espalhamento aumentou de forma bastante significativa com o aumento do teor de água e adjuvantes usados embora provocando também a diminuição de densidade. No entanto, a diminuição da densidade das argamassas não

afetou muito negativamente o desempenho das mesmas, uma vez que se mantêm valores elevados em relação à argamassa sem ASIC. Assim, face ao aumento do espalhamento das argamassas, a resistência mecânica diminuiu ligeiramente com o aumento do teor de água e adjuvantes, mas este decréscimo não é relevante face ao grande benefício de aumentar quase para o dobro o espalhamento destas argamassas no estado fresco. Simultaneamente, registou-se que também a condutibilidade térmica destas formulações não sofreu uma diminuição relevante.

No estudo do efeito da introdução de material de mudança de fase nas argamassas melhoradas com ASIC, constatou-se que a introdução dos dois tipos de PCM usados provocaram uma diminuição no espalhamento e na densidade das amostras. A rigidez e a resistência mecânica das argamassas foi reduzida de forma significativa com a introdução de PCM e, embora mantendo-se em valores aceitáveis para a aplicação considerada, requerem estudos adicionais de otimização destas formulações.

Com base nos ensaios da condutibilidade térmica realizados em algumas das formulações desenvolvidas, realizou-se a simulação numérica de um sistema de pavimento radiante hidráulico que permitiu comprovar que a incorporação de ASIC nas argamassas para a camada de enchimento provoca um aumento benéfico da temperatura à superfície do piso, tornando-se vantajoso em termos de aquecimento de espaços interiores e, conseqüentemente, na eficiência energética global dos edifícios.

Considerando as conclusões atingidas com base no trabalho desenvolvido, será de interesse para trabalhos futuros considerar os seguintes aspetos:

- Otimizar as formulações, com base na distribuição granulométrica das misturas, de modo a se obter uma maior densidade das mesmas e uma otimização das restantes propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas;
- Melhorar o grau de empacotamento nas argamassas desenvolvidas, de forma que a introdução de componentes como o ASIC, materiais de mudança de fase ou outros resultem numa melhoria da densidade, resistência mecânica e da capacidade de transferência térmica do pavimento radiante;
- Otimizar o teor de adjuvantes nas formulações, com vista ao aumento do desempenho mecânico e térmico das argamassas para pavimentos radiantes;
- Realizar ensaios de análise da condutibilidade térmica e capacidade calorífica das argamassas com introdução conjunta de ASIC e PCM;

- Desenvolver, com base em estudos de simulação numérica, as argamassas otimizadas com incorporação simultânea de ASIC e PCM.

Capítulo 7

Referências bibliográficas

7. Referências bibliográficas

- [1] J. Lee, S. Wi, S. G. Jeong, S. J. Chang, e S. Kim, «Development of thermal enhanced n-octadecane/porous nano carbon-based materials using 3-step filtered vacuum impregnation method», *Thermochim. Acta*, vol. 655, n. January, pp. 194–201, 2017, doi: 10.1016/j.tca.2017.06.013.
- [2] R. Vicente e T. Silva, «Brick masonry walls with PCM macrocapsules: An experimental approach», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 67, n. 1–2, pp. 24–34, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.069.
- [3] G. Zhou e J. He, «Thermal performance of a radiant floor heating system with different heat storage materials and heating pipes», *Appl. Energy*, vol. 138, pp. 648–660, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.10.058.
- [4] S. Sattari e B. Farhanieh, «A parametric study on radiant floor heating system performance», *Renew. Energy*, vol. 31, n. 10, pp. 1617–1626, 2005, doi: 10.1016/j.renene.2005.09.009.
- [5] V. Echarri-Iribarren, C. Rizo-Maestre, e J. L. Sanjuan-Palermo, «Underfloor heating using ceramic thermal panels and solar thermal panels in public buildings in the Mediterranean: Energy savings and healthy indoor environment», *Appl. Sci.*, vol. 9, n. 10, pp. 1–18, 2019, doi: 10.3390/app9102089.
- [6] R. Modolo, V. M. Ferreira, L. M. Machado, M. Rodrigues, e I. Coelho, «Construction materials as a waste management solution for cellulose sludge», *Waste Manag.*, vol. 31, n. 2, pp. 370–377, 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2010.09.017.
- [7] P. Devaux e M. M. Farid, «Benefits of PCM underfloor heating with PCM wallboards for space heating in winter», *Appl. Energy*, vol. 191, pp. 593–602, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.01.060.
- [8] L. O. Afolabi *et al.*, «Thermal energy storage phase change material cement mortar incorporated with clinical waste composites», *Int. J. Energy Res.*, vol. 45, n. 9, pp. 13575–13590, 2021, doi: 10.1002/er.6687.
- [9] S. Lu, J. Gao, H. Tong, S. Yin, X. Tang, e X. Jiang, «Model establishment and operation optimization of the casing PCM radiant floor heating system», *Energy*, vol. 193, p. 116814, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.116814.
- [10] G. Portugal, «Climatização Radiante». https://static.giacomini.com/pt.giacomini.com/catalog/Catalogos_Tecnicos/Pavimento_Radiante_catalogo_R001PT.pdf (acedido Nov. 29, 2021).
- [11] Diarplo, «Sistemas de Climatización». <http://diarplo.com.mx/calefaccion-porsuelo-radiante.html> (acedido Dez. 30, 2021).
- [12] K. N. Rhee e K. W. Kim, «A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment», *Build. Environ.*, vol. 91, pp. 166–190, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.03.040.
- [13] F. Kreith e M. S. Bohn, «Princípios de Transferência de Calor». p. 623, 2003.
- [14] A. Valves, «Radiant Floor Heating Benefits and Considerations».

- <http://www.apollovalves.com/article/radiant-floor-heating-benefits-and-considerations> (acedido Dez. 21, 2021).
- [15] S. Baek e S. Kim, «Analysis of Thermal Performance and Energy Saving Potential by PCM Radiant Floor Heating System», 2019, doi: 10.3390/en12050828.
- [16] T. underfloor Heating, «Electric Underfloor heating systems for wooden floors». <https://www.theunderfloorheatingstore.com/confused/electric-underfloor-heating-systems-for-wooden-floors> (acedido Jan. 04, 2022).
- [17] E. Saver, «Radiant Heating». <https://www.energy.gov/energysaver/radiant-heating> (acedido Dez. 21, 2021).
- [18] Warmup, «Sistema StickyMat». <https://www.warmup.pt/piso-radiante/eletrico/redes-radiantes/stickymat> (acedido Dez. 21, 2021).
- [19] Tecnis, «Piso Radiante Elétrico». <https://tecnisipisoradiante.pt/> (acedido Dez. 21, 2021).
- [20] Warmup, «Redes Radiantes». <https://www.warmup.pt/piso-radiante/eletrico/redes-radiantes> (acedido Dez. 21, 2021).
- [21] G. C. Eficiente, «Piso radiante Elétrico». <https://www.guiacasaeficiente.com/Pisos/RadianteEletrico.html> (acedido Dez. 21, 2021).
- [22] Warmup, «Sistemas de Piso Radiante Hidráulico». <https://www.warmup.pt/piso-radiante/hidraulico> (acedido Dez. 21, 2021).
- [23] G. C. Eficiente, «Tipos de Pisos Radiantes Hidráulicos». <https://www.guiacasaeficiente.com/Pisos/RadianteTipos.html> (acedido Dez. 21, 2021).
- [24] G. C. Eficiente, «Sistemas de piso radiante para arrefecimento de edifícios». <https://www.guiacasaeficiente.com/Pisos/RadianteHidraulicoArrefecimento.html> (acedido Dez. 21, 2021).
- [25] H. Zhao, Z. Wang, e L. Zhang, «Influence of covering layer on surface temperature of floor radiant heating system», *Appl. Mech. Mater.*, vol. 204–208, pp. 4260–4263, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.4260.
- [26] C. Pinto, «Estudo de betonilhas de sistemas de pavimento radiante: simulação numérica e estudos paramétricos», Universidade de Aveiro, 2020.
- [27] P. Ding, Y. Li, E. Long, Y. Zhang, e Q. Liu, «Study on heating capacity and heat loss of capillary radiant floor heating systems», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 165, pp. 1–7, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114618.
- [28] X. Jin, X. Zhang, Y. Luo, e R. Cao, «Numerical simulation of radiant floor cooling system: The effects of thermal resistance of pipe and water velocity on the performance», *Build. Environ.*, vol. 45, n. 11, pp. 2545–2552, 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.05.016.
- [29] S. Baek e S. Kim, «Determination of Optimum Hot-Water Temperatures for PCM Radiant Floor-Heating Systems Based on the Wet Construction Method», 2018, doi: 10.3390/su10114004.

- [30] M. T. Plytaria, C. Tzivanidis, E. Bellos, e K. A. Antonopoulos, «Energetic investigation of solar assisted heat pump underfloor heating systems with and without phase change materials», *Energy Convers. Manag.*, vol. 173, n. July, pp. 626–639, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.08.010.
- [31] Y. Xia e X. S. Zhang, «Experimental research on a double-layer radiant floor system with phase change material under heating mode», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 96, pp. 600–606, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.11.133.
- [32] H. Y. Wang, W. C. Wang, J. C. Wang, e Y. W. Chen, «Evaluation of the engineering properties and durability of mortar produced using ground granulated blast-furnace slag and stainless steel reduced slag», *Constr. Build. Mater.*, vol. 280, p. 122498, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122498.
- [33] M. Baawain, H. Shoukry, e K. Al-Jabri, «An Investigation into the Thermo-Physical, Mechanical, and Microstructural Properties of Cement Mortar Incorporating Hybrid Waste Slags», *International Journal of Civil Engineering*, vol. 19, n. 1. pp. 17–26, 2021, doi: 10.1007/s40999-020-00554-z.
- [34] A. Santamaría, J. J. González, M. M. Losáñez, M. Skaf, e V. Ortega-López, «The design of self-compacting structural mortar containing steelmaking slags as aggregate», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 111, n. March, 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103627.
- [35] J. Castro Mendes, R. R. Barreto, V. de Freitas Vilaça, A. V. Lopes, H. A. de Souza, e R. A. F. Peixoto, «Coating mortars based on mining and industrial residues», *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 22, n. 5, pp. 1569–1586, 2020, doi: 10.1007/s10163-020-01051-0.
- [36] I. Santamaría-Vicario, A. Rodríguez, C. Junco, S. Gutiérrez-González, e V. Calderón, «Durability behavior of steelmaking slag masonry mortars», *Mater. Des.*, vol. 97, pp. 307–315, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.02.080.
- [37] M. Ozturk, O. Akgol, U. K. Sevim, M. Karaaslan, M. Demirci, e E. Unal, «Experimental work on mechanical, electromagnetic and microwave shielding effectiveness properties of mortar containing electric arc furnace slag», *Constr. Build. Mater.*, vol. 165, pp. 58–63, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.031.
- [38] S. Cunha, J. Aguiar, V. Ferreira, e A. Tadeu, «Comportamento térmico de argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase», 2018.
- [39] L. Olivieri, J. A. Tenorio, D. Revuelta, L. Navarro, e L. F. Cabeza, «Developing a PCM-enhanced mortar for thermally active precast walls», *Constr. Build. Mater.*, vol. 181, pp. 638–649, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.013.
- [40] A. Figueiredo, J. Lapa, R. Vicente, e C. Cardoso, «Mechanical and thermal characterization of concrete with incorporation of microencapsulated PCM for applications in thermally activated slabs», *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, pp. 639–647, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.225.
- [41] R. M. S. F. Almeida *et al.*, «Experimental and Numerical Simulation of a Radiant Floor System: The Impact of Different Screed Mortars and Floor Finishings», *Materials (Basel)*, vol. 15, n. 3, 2022, doi: 10.3390/ma15031015.
- [42] NP EN 197-1., «Cimento Parte 1: Composição, especificações e critérios de

- conformidade para cimentos correntes», pp. 1–19, 2001.
- [43] IPQ, «- NP EN 933-1: Ensaios das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração. Monte da Caparica.», 2000.
- [44] N. P. E. N. Iso e A. C. Maio, «NP EN 1097-6 2003», pp. 1–6, 2007.
- [45] IPQ, «NP EN 1097-3:2002 - Determinação da Baridade e do Volume de Vazios», 2002.
- [46] F. Rebelo, A. Figueiredo, R. Vicente, e V. M. Ferreira, «Study of a thermally enhanced mortar incorporating phase change materials for overheating reduction in buildings», *J. Energy Storage*, vol. 46, n. December 2021, p. 103876, 2022, doi: 10.1016/j.est.2021.103876.
- [47] M. Bravo, J. de Brito, L. Evangelista, e J. Pacheco, «Superplasticizer's efficiency on the mechanical properties of recycled aggregates concrete: Influence of recycled aggregates composition and incorporation ratio», *Constr. Build. Mater.*, vol. 153, pp. 129–138, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.103.
- [48] A. L. Oliveira, B. P. Corrêa, I. F. R. Ribeiro, R. A. Souza, e L. M. L. Calçada, «Influência do uso de aditivo retentor de água à base de éter de celulose nas propriedades das argamassas de assentamento em alvenaria estrutural de blocos de concreto», *Ambient. Construído*, vol. 15, n. 3, pp. 57–69, 2015, doi: 10.1590/s1678-86212015000300026.
- [49] E. Spychał e P. Czapik, «The influence of cement type on the properties of plastering mortars modified with cellulose ether admixture», *Materials (Basel)*, vol. 14, n. 24, 2021, doi: 10.3390/ma14247634.
- [50] CEN: European Committee for Standardization, «EN 196-1 Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength», n. 5. 2016, doi: 10.4324/9781315780320-29.
- [51] CEN: European Committee for Standardization, *EN1015_6*. 1998.
- [52] CEN: European Committee for Standardization, «EN 1015-3: 1998 - Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)». p. 9, 1998.
- [53] CEN: European Committee for Standardization, *EN 1015-10:1999 - Methods of test fr mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar*. 1999, p. 8.
- [54] E. Way, «Ultrasonic Pulse Velocity Testing Technical Reference Manual», vol. 44, n. August, pp. 1–25, 2004.
- [55] B. Standard, «BS 1881-203:1986», *J. (Royal Soc. Heal.*, vol. 76, n. 8, pp. 435–435, 1986, doi: 10.1177/146642405607600807.
- [56] CEN: European Committee for Standardization, «EN 1015-11:1999 - Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar». p. 15, 1999.
- [57] CEN: European Committee for Standardization, European Standard, *prEN1015_11 - Resistencia flexao e compressao argamassas.pdf* .

- [58] J. M. B. C. Azevedo, «Absorção por capilaridade de soluções aquosas salinas em materiais porosos», Universidade do Porto, 2013.
- [59] CEN: European Committee for Standardization, «EN1015_18».
- [60] M. G. Gomes, I. Flores-Colen, L. M. Manga, A. Soares, e J. de Brito, «The influence of moisture content on the thermal conductivity of external thermal mortars», *Constr. Build. Mater.*, vol. 135, pp. 279–286, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.166.
- [61] British Standard, «BS EN 13813:2002 - Screed material and floor screeds», vol. 3. 2002.
- [62] I. Santamaría-Vicario, A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González, e V. Calderón, «Design of masonry mortars fabricated concurrently with different steel slag aggregates», *Constr. Build. Mater.*, vol. 95, pp. 197–206, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.164.
- [63] F. A. Amancio, A. R. de O. Dias, D. A. Lima, e A. E. B. Cabral, «Estudo do comportamento no estado fresco e endurecido de argamassa com escória de aciaria BSSF», *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 26, n. 3. 2021, doi: 10.1590/s1517-707620210003.13031.
- [64] A. Santamaría, E. Rojí, M. Skaf, I. Marcos, e J. J. González, «The use of steelmaking slags and fly ash in structural mortars», *Constr. Build. Mater.*, vol. 106, pp. 364–373, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.121.
- [65] S. S. Lucas, V. M. Ferreira, e J. L. B. De Aguiar, «Latent heat storage in PCM containing mortars - Study of microstructural modifications», *Energy Build.*, vol. 66, pp. 724–731, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.07.060.
- [66] M. Kheradmand, M. Azenha, J. L. B. de Aguiar, e J. Castro-Gomes, «Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behaviour of buildings», *Energy*, vol. 94, pp. 250–261, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.10.131.
- [67] M. Kheradmand, M. Azenha, J. L. B. De Aguiar, e K. J. Krakowiak, «Thermal behavior of cement based plastering mortar containing hybrid microencapsulated phase change materials», *Energy Build.*, vol. 84, pp. 526–536, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.08.010.
- [68] L. Haurie, S. Serrano, M. Bosch, A. I. Fernandez, e L. F. Cabeza, «Single layer mortars with microencapsulated PCM: Study of physical and thermal properties, and fire behaviour», *Energy Build.*, vol. 111, pp. 393–400, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.11.028.
- [69] X. Huang, C. Zhu, Y. Lin, e G. Fang, «Thermal properties and applications of microencapsulated PCM for thermal energy storage: A review», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 147, n. November 2018, pp. 841–855, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.11.007.
- [70] T. Salgueiro, A. Samagaio, M. Gonçalves, A. Figueiredo, J. Labrincha, e L. Silva, «Incorporation of phase change materials in an expanded clay containing mortar for indoor thermal regulation of buildings», *J. Energy Storage*, vol. 36, n. January, p. 102385, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102385.