

Estudo de Formulações de Argamassas para Sistemas de Pavimento Radiante com Incorporação de Agregado Siderúrgico

Study of Mortar Formulations for Underfloor Heating Systems Incorporating Steel Aggregate

A. Figueira^{a†}, F. Rebelo^a, H. Paiva^a, A. Figueiredo^a, R. Almeida^{b,c}, R. Vicente^a, V. Ferreira^a

^a RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal

^b Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Viseu, Campus Politécnico de Repeses, 3504-510, Viseu, Portugal

^c CONSTRUCT-LFC, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, Portugal

[†] Autor para correspondência: adrianamargarida@ua.pt

RESUMO

Considerando as metas europeias para a eficiência energética e descarbonização, sem comprometer o conforto térmico, é necessário definir soluções de climatização mais eficientes e sustentáveis, nas vertentes da conceção, do uso de materiais e ainda da eficiência de sistemas. A melhoria das propriedades térmicas das argamassas utilizadas nos sistemas de pavimento radiante é uma estratégia promissora para o aumento da eficiência térmica e energética destes sistemas que têm ganho quota de mercado não só no norte e centro da Europa, bem como na América do Norte. A eficiência térmica e energética dos sistemas de pavimento radiante hidráulicos é dependente da geometria e constituição das camadas, dos materiais empregues e das condições de operação, tendo grande impacto as propriedades termofísicas da argamassa utilizada para envolver as tubagens. Numa perspetiva de valorização de um resíduo industrial como contributo específico para a sustentabilidade na construção, é objeto de estudo deste trabalho a incorporação de um Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC) como substituto parcial do agregado natural de uma argamassa fluída autonivelante para melhorar o seu desempenho em sistemas de pavimento radiante. Para além da caracterização térmica e mecânica de argamassas com diferentes teores de ASIC, o desempenho das argamassas neste tipo de aplicação foi também aferido através de um modelo numérico calibrado.

ABSTRACT

Considering the European targets for energy efficiency and decarbonization, without compromising thermal comfort, it's necessary to define more efficient and sustainable air conditioning solutions, in terms of design, use of materials and even system efficiency. Improving the thermal properties of mortars used in underfloor heating systems is a promising strategy for increasing the thermal and energy efficiency of these systems, which have gained market share not only in northern and central Europe, but also in North America. The thermal and energy efficiency of hydraulic underfloor heating systems depends of the geometry and constitution of the layers, the materials used and the operating conditions, with a great impact on the thermophysical properties of the mortar

Palavras-chave:

Pavimento Radiante;
Argamassas; Resíduo
Siderúrgico;
Transferência de Calor.

Keywords:

Underfloor heating;
Mortars; Steel
Aggregate; Heat
Transfer.

used to surround the pipes. From a perspective of valuing industrial waste as a specific contribution for sustainability in construction, the object of study of this work is the incorporation of an Inert Steel Aggregate for Construction (ASIC) as a partial substitute for the natural aggregate of a self-levelling fluid mortar to improve its performance in underfloor heating systems. In addition to the thermal and mechanical characterization of mortars with different ASIC contents, the performance of mortars in this type of application was also measured using a calibrated numerical model.

1. Introdução

O consumo de energia elétrica usada para a climatização de edifícios tem vindo a aumentar e, para o minimizar sem comprometer o conforto dos utentes, é essencial intensificar a investigação sobre estratégias de aquecimento e arrefecimento passivos, bem como o desenvolvimento de novos materiais e soluções construtivas com menor impacto ambiental e energia incorporada [1, 2].

Os sistemas de pavimento radiante são uma resposta à necessidade da evolução dos edifícios com maior eficiência energética, promovendo uma distribuição uniforme da temperatura ambiente e oferecendo a oportunidade de aplicar recursos de elevada eficiência energética como, por exemplo, o aproveitamento solar, uma vez que quando instalados em conjunto com os sistemas de pavimento radiante permitem economizar cerca de 60% de energia para o seu funcionamento [3, 4].

A utilização de resíduos como matérias-primas alternativas tem vindo a aumentar, tornando-se bastante importante na ótica da sustentabilidade na construção ao permitirem a redução da extração e utilização de agregados naturais em diversos materiais de construção. Existem na literatura muitos exemplos de diversas aplicações de resíduos de diferentes proveniências, mas destacam-se aqui alguns exemplos de valorização de resíduos da indústria metalúrgica. Foram utilizados vários tipos de resíduos de escórias metalúrgicas para aplicação em argamassas, em substituição quer do ligante como dos agregados. Santamaría et al., (2020) [5] estudaram a incorporação de escórias de forno a arco elétrico (EAFS) como agregado e escórias de forno de panela de alta sílica (LFS), onde substituíram 30% de ligante e 70% de agregado fino, tendo verificado que a densidade das argamassas com agregado de EAFS aumentou cerca de 11% bem como a sua resistência mecânica. Já em relação à substituição apenas dos agregados das argamassas Ozturk et al., (2018) [6], assim como outros autores [7-10], aplicaram escórias de forno a arco elétrico em argamassas cimentícias, alcançando um aumento da resistência mecânica à flexão e à compressão de cerca de 30% e 18%, respetivamente, quando incorporaram 40% daquele resíduo. Neste trabalho procurou-se usar um outro resíduo siderúrgico (ASIC) resultante da produção do aço, com o intuito de, por via da sua maior densidade, melhorar a transmissão térmica das argamassas usadas na envolvente dos pavimentos radiantes.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

Os materiais utilizados neste estudo foram os seguintes: cimento, agregados naturais, agregado siderúrgico, água, redutor e retentor de água. O cimento e os agregados naturais foram fornecidos pela empresa Saint-Gobain Portugal, S.A. e o Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC) foi proveniente da empresa SN Maia (grupo MEGASA) através da empresa Harsco Environmental.

O cimento utilizado nas argamassas foi um cimento tipo CEM II/A-L 42.5 R. Os agregados naturais são duas areias com diferentes granulometrias, em que o agregado mais fino é um filler e o agregado de dimensão média é uma areia siliciosa e, por fim, contém ainda um agregado calcário mais grosso com dimensões entre 1.5 e 3.0 mm, com massas volúmicas de, respetivamente, 2660, 2600 e 2700 kg/m³. O ASIC é proveniente de um resíduo da indústria do aço com uma massa volúmica de 3480 kg/m³. A água utilizada foi a da rede de consumo e, em

termos de adjuvantes nas formulações, foi usado um agente redutor de água, com base num éter policarboxilato com a função de melhorar o espalhamento e um agente retentor de água, cuja substância base é o hidroxipropilmetilcelulose, tendo este último a função de evitar a perda de água em substratos porosos e absorventes.

2.2. Procedimentos

O estudo realizado tem como principal objetivo o desenvolvimento de argamassas com incorporação de um resíduo siderúrgico para aplicação em sistemas de pavimentos radiantes. Neste contexto, o plano experimental tomou duas linhas de ação. A primeira, ao nível dos materiais, que consistiu no desenvolvimento de argamassas e sua avaliação no estado fresco e no estado endurecido, sendo o alvo de estudo formulações cuja incorporação do ASIC foi realizada em substituição total do agregado médio e em substituição total do agregado médio e grosso (Tabela 1). Foi desenvolvida uma formulação de referência, denominada de AR, e posteriormente, duas formulações com incorporação de diferentes teores de resíduo siderúrgico, as quais foram avaliadas ao nível das suas características. No estado fresco foi determinada a consistência por espalhamento, e no estado endurecido foi avaliada a densidade, a resistência mecânica e, por fim, a condutibilidade térmica. Na segunda linha de ação, foram utilizados em estudos de simulação numérica os resultados obtidos na fase experimental, para se avaliar o comportamento térmico das argamassas desenvolvidas quando aplicadas num sistema de pavimento radiante hidráulico. Para tal foi usado o software FEMIX num modelo anteriormente calibrado e validado [11].

Tabela 1 - Formulações desenvolvidas.

Denominação	Cimento	Filler	Agregado Médio	Agregado Grosso Calcário	ASIC	Água	Agente Redutor de água (SP)	Agente Retentor de água (EC)
AR	15%	35%	35%	15%	0%	9%	0%	0%
A35ASIC	15%	35%	0%	15%	35%	9%	0%	0%
A35ASIC_11W1.5SP0.08EC	15%	35%	0%	15%	35%	11%	1,5%	0,08%
A35ASIC_13W	15%	35%	0%	15%	35%	13%	0%	0%
A50ASIC	15%	35%	0%	0%	50%	9%	0%	0%
A50ASIC_11W1.5SP0.08EC	15%	35%	0%	0%	50%	11%	1,5%	0,08%
A50ASIC_13W	15%	35%	0%	0%	50%	13%	0%	0%

Os ensaios realizados seguiram as normas vigentes. No caso do ensaio da consistência por espalhamento seguiu-se o especificado pela norma europeia EN 1015-3 [12]. Após a produção das argamassas, foram moldados os provetes de ensaio com dimensões de 40×40×160 mm³ e acondicionados em câmara climática a 20°C e 95% de humidade relativa durante 28 dias, após os quais se seguiram os ensaios no estado endurecido, nomeadamente, a densidade determinada segundo a norma europeia EN 1015-10 [13], a resistência mecânica à flexão e à compressão, segundo a norma europeia EN 1015-11 [14] e, por fim, a condutibilidade térmica foi determinada em provetes de forma circular, com diâmetro de 50 mm e espessura de 15 mm, com recurso ao equipamento Holometrix C-Matic (modelo TCA-200).

De seguida, para avaliação do impacto da incorporação do agregado siderúrgico na camada de enchimento, foi realizada uma simulação numérica, cujo software (FEMIX) recorre ao Método dos Elementos Finitos e se desenvolve segundo a forma geral, em coordenadas cartesianas tridimensionais, pela equação da transferência de calor.

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 a temperatura do ar é de 18°C e que o sistema de circulação de água funciona durante 6 horas contínuas, em que a temperatura da água aumenta de forma progressiva até aos 45°C, com início aos 20°C, conforme se mostra na Figura 1.

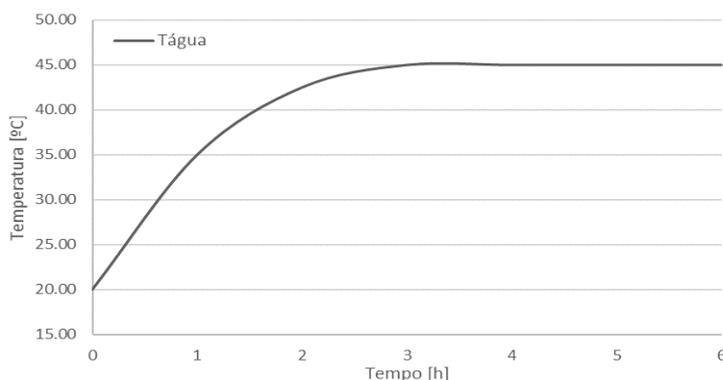


Figura 1 - Perfil da temperatura da água.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 2 apresenta os resultados experimentais das formulações desenvolvidas a partir da argamassa de referência (AR). Duas formulações distintas foram desenvolvidas neste estudo preliminar, uma com 35% de ASIC a substituir o agregado médio (areia siliciosa) e outra em que se aumentou a quantidade do resíduo ASIC (para 50%) por substituição do agregado grosso calcário para além do agregado médio. Em ambos os sistemas foram também feitas formulações com maior teor de água e de adjuvantes para melhorar o comportamento no estado fresco sem comprometer as propriedades no estado endurecido. Estas formulações estão descritas detalhadamente na Tabela 1. Como se pode ver na Tabela 2, as argamassas formuladas inicialmente com o teor base de água da argamassa de referência (de apenas 9%) não apresentam trabalhabilidade adequada para o fim a que se propõe, ou seja, a aplicação em sistemas de pavimento radiante. Por esse motivo, foi necessário aumentar o teor de água e de adjuvantes para que o espalhamento aumentasse de forma a provocar um bom envolvimento das tubagens do pavimento radiante.

Tabela 2 - Resultados laboratoriais obtidos.

Denominação	Espalhamento [mm]	Massa volúmica [kg/m ³]	Resistência à flexão [MPa]	Resistência à compressão [MPa]	Condutibilidade térmica [W/m.K]
AR	100	2029 ± 17,5	4,0 ± 0,1	19,3 ± 0,5	0,71 ± 0,05
A35ASIC	100	2325 ± 10,7	5,8 ± 0,1	26,6 ± 1,0	0,75 ± 0,02
A35ASIC_11W1.5SP0.08EC	160	2258 ± 10,0	5,3 ± 0,2	17,9 ± 0,3	0,75 ± 0,14
A35ASIC_13W	200	2305 ± 5,3	4,4 ± 0,1	16,2 ± 0,7	0,87 ± 0,02
A50ASIC	100	2359 ± 8,8	4,9 ± 0,1	23,2 ± 0,3	0,74 ± 0,01
A50ASIC_11W1.5SP0.08EC	140	2306 ± 179,3	5,0 ± 0,0	19,1 ± 0,2	0,66 ± 0,05
A50ASIC_13W	210	2389 ± 18,3	4,4 ± 0,3	19,2 ± 0,8	0,77 ± 0,06

De facto, a introdução de teores mais elevados de água e a introdução dos agentes reductor e retentor de água leva a um aumento progressivo da consistência por espalhamento (para 160 a 200 mm). Por outro lado, em relação à densidade, comparando as amostras com 9% de água, esta aumenta com o aumento do teor de agregado denso nas misturas, devido à elevada densidade do agregado ASIC. No entanto, ao contrário da trabalhabilidade, com o aumento do teor de água e adjuvantes, a densidade de cada mistura diminui. Mais especificamente, as argamassas com adjuvantes na sua constituição apresentam uma densidade inferior em comparação com as restantes formulações, que é explicado pelo facto de no caso das argamassas com adjuvantes poderem promover a introdução de ar na matriz, que provoca uma diminuição na densidade das misturas, obtendo-se todavia materiais mais trabalháveis [10, 15]. A amostra A50ASIC é uma exceção que, com 13% de água, a sua densidade é a mais elevada, devido ao grande conteúdo de

um agregado de densidade superior, o ASIC.

Relativamente à resistência mecânica, focando nas formulações com 9% de água, apesar de o aumento do teor de ASIC nas misturas apresentar um aumento da densidade das mesmas, neste caso, o facto de a mistura A35ASIC conter ainda teor de agregado grosso calcário o que já não sucede na mistura A50ASIC, faz com que o empacotamento da matriz seja diferente em relação à referência (AR), e se traduza num valor 31% e 27% superior na resistência mecânica à flexão e à compressão, respetivamente. Em relação à amostra A50ASIC, o aumento relativo à referência AR é de apenas 15% e 13%, respetivamente. Julga-se que este efeito pode ser explicado pela combinação do agregado calcário e do agregado siderúrgico na matriz. Ainda em relação à resistência mecânica, para todas as formulações desenvolvidas, a resistência diminuiu ligeiramente mas não de forma significativa com o aumento progressivo de água e adjuvantes que causou um aumento considerável do espalhamento destas argamassas.

Por fim, a condutibilidade térmica das argamassas cujo teor de água é 9%, aumenta com a maior incorporação do teor de resíduo siderúrgico. Por outro lado, quando se aumenta o teor de água e se incorpora adjuvantes, o mesmo não acontece. Uma vez que a condutibilidade depende da densidade e da porosidade da matriz, não sendo uma relação linear, ao incorporar maior percentagem de ASIC, a densidade da amostra global irá aumentar. No entanto, pode não significar um aumento de condutibilidade térmica, uma vez que o aumento do teor de ASIC poderá também conduzir a um aumento da porosidade da matriz criada por dificuldades de empacotamento e conseqüente diminuição da condutibilidade térmica.

Após os resultados laboratoriais obtidos, foram selecionadas as formulações que teriam uma melhor relação entre todas as propriedades analisadas, e as suas características foram introduzidas no modelo numérico, bem como os restantes materiais utilizados na simulação (ver Tabela 3). Sucintamente, o modelo foi utilizado para avaliar o impacto da utilização de uma argamassa, considerada de referência e outras formulações estudadas na distribuição das temperaturas à superfície.

Tabela 3 - Propriedades dos materiais utilizados no modelo.

Material	Densidade [kg/m ³]	Condutibilidade térmica [W/m.K]	Calor específico [J/kg.K]
Argamassa AR	2029	0,71	800
Argamassa A35ASIC_13W	2305	0,87	800
Argamassa A50ASIC_13W	2389	0,77	800
Material de Isolamento	2500	2,00	1000
Betão	70.5	0,04	1000

Os resultados obtidos mostraram que a incorporação de agregado siderúrgico ASIC na camada de argamassa provoca um aumento da temperatura superficial atingida, e desse modo, afeta positivamente a eficiência dos sistemas de pavimento radiante. A Figura 2 representa a distribuição da temperatura superficial do pavimento, para as diferentes formulações de argamassa utilizada.

A Figura 3 representa o perfil da evolução da temperatura superficial para diferentes formulações de argamassa. Pela análise dos resultados a argamassa com a condutibilidade térmica mais elevada, resulta conseqüentemente numa transferência de temperatura para a superfície também mais elevada. A temperatura máxima atingida pelo sistema de pavimento radiante com argamassa A35ASIC_13W atingiu o valor de 35.77°C. No caso da argamassa de referência e a argamassa A50ASIC_13W, as temperaturas máximas atingidas à superfície foram, respetivamente, 34.64°C e 34.99°C.

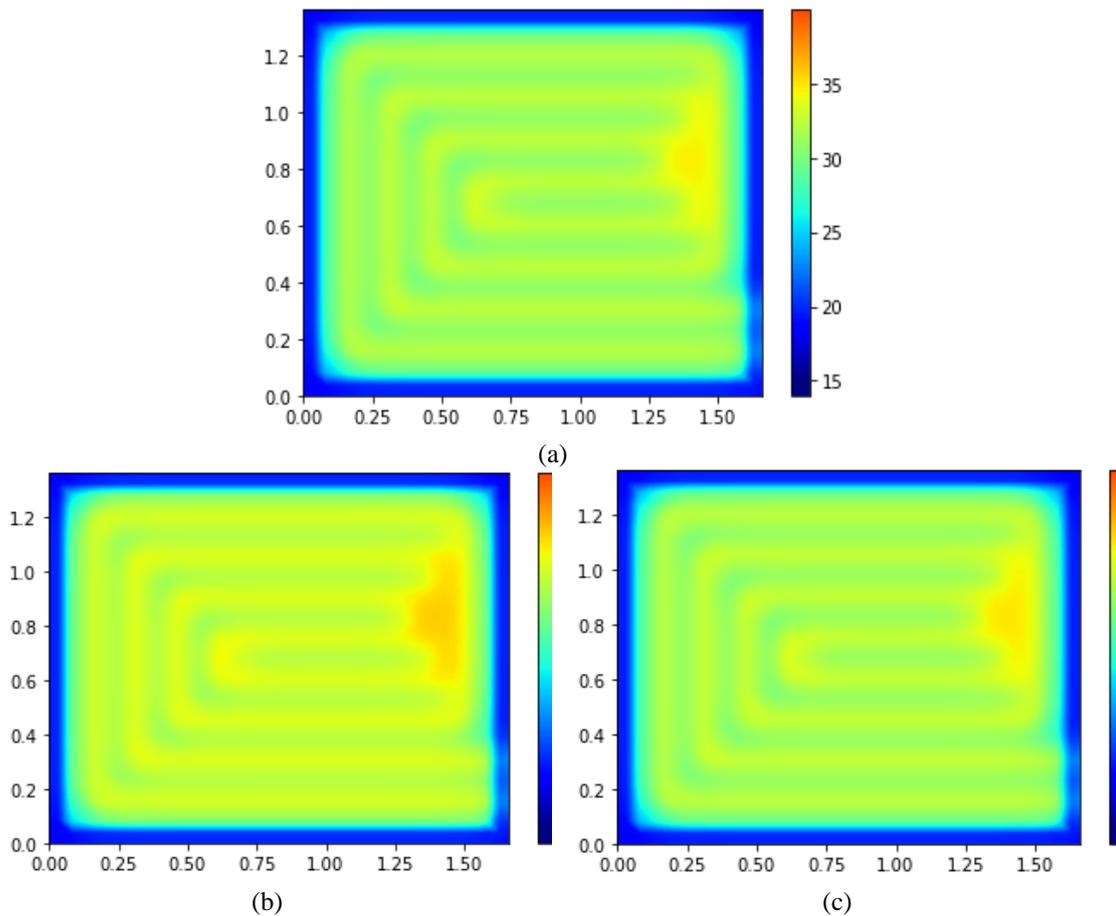


Figura 2 - Distribuição da temperatura na superfície do pavimento radiante para diferentes formulações de argamassas: (a) Argamassa de referência; (b) A35ASIC_13W; (c) A50ASIC_13W.

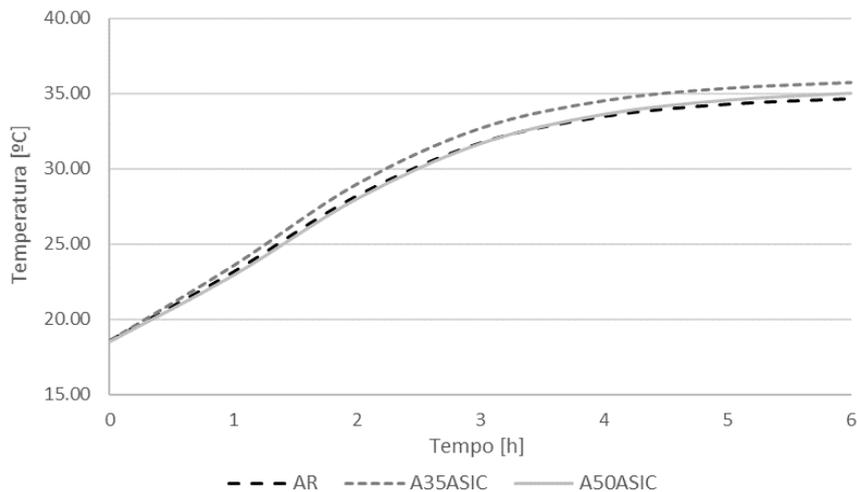


Figura 3 - Perfil da temperatura à superfície do pavimento para diferentes formulações de argamassa.

A utilização de uma argamassa com 35% de agregado siderúrgico e 13% de água na sua constituição, apresentou-se como a mais vantajosa em termos de temperatura à superfície e, conseqüentemente, na eficiência térmica dos pavimentos, na medida que poderá conduzir a um tempo de operação mais reduzido. Esta formulação também apresentou um maior crescimento da temperatura à medida que o sistema de aquecimento de água está em funcionamento, sempre com

temperaturas mais elevadas à superfície ao longo do tempo de aquecimento de 6 horas. O contrário acontece na formulação da argamassa sem agregado siderúrgico e com 50% deste agregado denso, em que, até às 3 horas de funcionamento, a introdução do agregado denso não aparenta contribuir para uma temperatura à superfície mais elevada. Após as 3 horas de funcionamento do sistema e quando a temperatura da água já circula a 45°C, a argamassa com 50% de ASIC provoca no sistema de pavimento radiante maiores temperaturas à superfície do que a argamassa de referência, no entanto, esta diferença registada é, no máximo, de 1%.

4. Conclusões

Este trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento e caracterização de formulações de argamassas com incorporação de resíduo siderúrgico como agregado e posterior simulação numérica do desempenho térmico de um sistema de pavimento radiante com as diferentes formulações desenvolvidas, para efeitos de comparação e avaliação do efeito do agregado denso na camada de enchimento do sistema na temperatura superficial do mesmo.

A densidade e a resistência mecânica das argamassas aumentaram com o acréscimo de incorporação do agregado denso ASIC nas formulações, para uma mesma quantidade de água. Por outro lado, a adição de mais água e de adjuvantes, apesar de aumentar a consistência por espalhamento, fator favorável ao tipo de aplicação aqui em causa, conduz a uma diminuição, embora ligeira, da densidade e da resistência mecânica à flexão e à compressão, pelo aumento da porosidade interna da matriz.

Em relação à condutibilidade térmica, um maior teor de agregado denso não representa automaticamente um aumento desta característica, uma vez que existe um balanço entre o aumento de densidade trazido pela incorporação de um agregado mais denso (ASIC) na mistura, que pode ser contrariado pelo efeito da sua introdução induzir uma matriz mais porosa pelo empacotamento gerado, que acaba por contribuir para o ligeiro decréscimo da condutibilidade térmica.

As melhores formulações foram testadas numericamente num sistema de pavimento radiante, obtendo-se, para a amostra com maior condutibilidade térmica, um aumento de cerca de 1°C na temperatura superficial, durante as 6 horas de funcionamento do sistema. A argamassa com 35% de agregado siderúrgico e com 13% de água foi a que apresentou o melhor desempenho térmico. Concluiu-se assim que é possível obter uma argamassa com este agregado siderúrgico (ASIC) com desempenho térmico melhorado e sem comprometer a trabalhabilidade e a resistência mecânica para este tipo de aplicação em pavimentos radiantes.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro do projeto Super Energy Radiant Floor Systems – SEERFloor, PTDC/ECI-COM/3436/2020.

Referências

- [1] J. Lee, S. Wi, S.G. Jeong, S.J. Chang, S. Kim, Development of thermal enhanced n-octadecane/porous nano carbon-based materials using 3-step filtered vacuum impregnation method, *Thermochim. Acta*, 655 (2017) 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.06.013>.
- [2] R. Vicente, T. Silva, Brick masonry walls with PCM macrocapsules: An experimental approach, *Appl. Therm. Eng.*, 67 (2014) 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.069>.
- [3] G. Zhou, J. He, Thermal performance of a radiant floor heating system with different heat storage materials and heating pipes, *Appl. Energy*, 138 (2015) 648-660. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.058>.
- [4] V. Echarri-Iribarren, C. Rizo-Maestre, 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.*, 9 (2019) 1-18. <https://doi.org/10.3390/app9102089>.

- [5] A. Santamaría, J.J. González, M.M. Losáñez, M. Skaf, V. Ortega-López, The design of self-compacting structural mortar containing steelmaking slags as aggregate, *Cem. Concr. Compos.*, 111 (2020) 103627. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103627>.
- [6] M. Ozturk, O. Akgol, U.K. Sevim, M. Karaaslan, M. Demirci, E. Unal, Experimental work on mechanical, electromagnetic and microwave shielding effectiveness properties of mortar containing electric arc furnace slag, *Constr. Build. Mater.*, 165 (2018) 58-63. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.031>.
- [7] H.Y. Wang, W.C. Wang, J.C. Wang, 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.*, 280 (2021) 122498. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122498>.
- [8] M. Baawain, H. Shoukry, K. Al-Jabri, An Investigation into the Thermo-Physical, Mechanical, and Microstructural Properties of Cement Mortar Incorporating Hybrid Waste Slags, *Int. J. Civ. Eng.*, 19 (2021) 17-26. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00554-z>.
- [9] J. Castro Mendes, R.R. Barreto, V. de Freitas Vilaça, A.V. Lopes, H.A. de Souza, R.A.F. Peixoto, Coating mortars based on mining and industrial residues, *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, 22 (2020) 1569-1586. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01051-0>.
- [10] I. Santamaría-Vicario, A. Rodríguez, C. Junco, S. Gutiérrez-González, V. Calderón, Durability behavior of steelmaking slag masonry mortars, *Mater. Des.*, 97 (2016) 307-315. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.080>.
- [11] R.M.S.F. Almeida, R.S. Vicente, A. Ventura-Gouveia, A. Figueiredo, F. Rebelo, E. Roque, V.M. Ferreira, Experimental and Numerical Simulation of a Radiant Floor System: The Impact of Different Screed Mortars and Floor Finishings, *Materials (Basel)*, 15 (2022) 1015. <https://doi.org/10.3390/ma15031015>.
- [12] European Committee for Standardization (CEN). EN 1015-3:1998, Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), 1998.
- [13] European Committee for Standardization (CEN). EN 1015-10:1999, Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar, 1999.
- [14] European Committee for Standardization (CEN). EN 1015-11:1999, Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, 1999.
- [15] I. Santamaría-Vicario, A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González, V. Calderón, Design of masonry mortars fabricated concurrently with different steel slag aggregates, *Constr. Build. Mater.*, 95 (2015) 197-206. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.164>.

ORCID

Adriana Margarida Marques Figueira

0009-0006-5881-3874

(<https://orcid.org/0009-0006-5881-3874>)

Filipe José da Silva Rebelo

0000-0002-2776-468X

(<https://orcid.org/0000-0002-2776-468X>)

António José Pereira de Figueiredo

0000-0003-4324-7006

(<https://orcid.org/0000-0003-4324-7006>)

Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida

0000-0002-9846-6081

(<https://orcid.org/0000-0002-9846-6081>)

Romeu da Silva Vicente

0000-0002-5456-1642

(<https://orcid.org/0000-0002-5456-1642>)

Victor Miguel Carneiro Sousa Ferreira

0000-0002-6295-1333

(<https://orcid.org/0000-0002-6295-1333>)