

Zhiyou Jia, José Aguiar, Sandra Cunha

Estudante de doutoramento, Professor Associado com Agregação, Investigadora Auxiliar
C-TAC - Centro de Território Ambiente e Construção, Universidade do Minho

CONSIDERAÇÕES GERAIS

O crescimento populacional global e o subsequente desenvolvimento das áreas urbanas têm desencadeado um crescimento acelerado na indústria da construção, resultando na geração massiva de resíduos de construção e demolição (RCD). O aumento contínuo na produção mundial de resíduos sólidos, testemunhou uma escalada de menos de 0,3 milhões de toneladas (Mt) por dia em 1900 para mais de 3,5 Mt por dia em 2010, com projeções indicando uma duplicação até 2025 e uma triplicação até 2100, tornando-se uma preocupação [1]. A mera deposição dos RCD em aterros sanitários tem acarretado consequências ambientais e ecológicas adversas, destacando a necessidade premente de adotar abordagens mais racionais para o tratamento e reutilização desses recursos na indústria da construção. Em resposta a esta preocupação, diversas regiões, como a Europa, os Estados Unidos, o Japão e a Coreia do Sul, já implementaram políticas eficazes de gestão e reutilização de RCD [2]. No entanto, em países em desenvolvimento como a China e a Índia, a taxa de aproveitamento desses resíduos é ainda notavelmente baixa, situando-se em cerca de 5% a 10% [3] e 1% [4], respetivamente. Assim, a gestão sustentável dos RCD emergiu como uma área de interesse crítico tanto para a indústria da construção quanto para a comunidade científica, reclamando a implementação de estratégias eficientes para minimizar o desperdício e promover a reutilização de materiais na construção civil.

Por outro lado, observa-se um relevante aumento dos consumos energéticos, especialmente devido à diminuição das reservas de fontes de energia não renováveis, como o petróleo e o gás natural, e à intensificação da crise energética, que tem sido exacerbada por conflitos internacionais sem precedentes. De acordo com dados da Agência Internacional de Energia (IEA) [5], o consumo global de energia para aquecimento, arrefecimento e produção de água quente em edifícios atingiu aproximadamente 10^{15} kJ em 2017, representando cerca de 20% do consumo total de energia dos setores finais. As economias emergentes, como China, Brasil e Índia, entre outros países, desempenham um papel significativo no consumo mundial de energia em edifícios. Em Portugal, o setor habitacional é responsável por mais de 30% da energia consumida, o que se traduz em emissões de gases com efeito de estufa significativas. Na China, de acordo com estatísticas do Comitê de Estatísticas de Consumo de Energia da Associação de Conservação de Energia de Edifícios, o consumo nacional de energia durante a fase operacional dos edifícios totalizou cerca de $2,93 \times 10^{13}$ MJ em 2018, representando aproximadamente 21,7% do consumo nacional de energia, enquanto as emissões de dióxido de carbono alcançaram 2,1 bilhões de toneladas, correspondendo a cerca de 21,9% do total das emissões do país [6]. Estes números ressaltam a urgência de medidas eficazes para reduzir o consumo de energia nos edifícios e mitigar os impactos ambientais associados, destacando a necessidade de soluções inovadoras e sustentáveis para o setor da construção.

Diante deste problema, torna-se evidente a necessidade de intervir no setor da construção, por meio da utilização de materiais funcionais, tais como os materiais de mudança de fase (PCM). Os materiais de mudança de fase representam um material baseado em energia verde [7]. Apresentam um bom desempenho de calor latente, podendo utilizar o seu efeito térmico de mudança de fase para armazenar o calor perdido no ambiente externo e, posteriormente, libertar e utilizar essa energia em condições adequadas, contribuindo para melhorar a eficiência energética dos edifícios. Esta ação pode, em parte, substituir o recurso a combustíveis fósseis. Estes materiais podem ser utilizados como meio de armazenamento térmico para aquecimento solar passivo [8], sendo incorporados em diversos materiais de construção, tais como argamassas [9] [10] [11], betão [12] [13] [14], placas de gesso cartonado [13] [14], ou ainda em tijolos e blocos [15] [16]. Deste modo, a investigação e o desenvolvimento de novos materiais de construção com capacidade de armazenamento de energia tem-se tornado uma questão de extrema importância para a comunidade científica, com base na utilização eficiente de várias fontes de energia, visando aliviar efetivamente a pressão causada pela perda de recursos provenientes de fontes não renováveis e pela degradação ambiental.

A utilização de PCM em materiais de construção tem vindo a mostrar-se uma técnica promissora na regulação da temperatura no interior dos edifícios. Contudo, grande parte dos trabalhos desenvolvidos apostaram em técnicas de incorporação de PCM dispendiosas, principalmente relacionadas com técnicas de encapsulamento, o que pode colocar em causa a ampla difusão e aplicação deste tipo de tecnologia. Assim, a funcionalização de agregados porosos utilizados como veículos para o aprisionamento de PCM, surge como uma técnica eficaz e de baixo custo com vista ao armazenamento de energia em edifícios residenciais e de serviços.

Assim, esta equipa de investigação decidiu desenvolver um betão inovador e sustentável com incorporação de agregado reciclado proveniente da indústria de construção, RCD, funcionalizado com PCM.

FUNCIONALIZAÇÃO DO RCD COM PCM

A incorporação de PCM nos RCD foi realizada com base em duas técnicas distintas, sendo estas a pressão atmosférica e o vácuo. De forma a garantir uma correta absorção de PCM pelo RCD, tornou-se necessário garantir a sua forma líquida, pelo que este foi colocado numa estufa, a uma temperatura controlada de 35°C, sendo a temperatura selecionada superior à temperatura de fusão do PCM, cerca de 22°C. Com o intuito de garantir a máxima absorção de PCM pelo RCD, o agregado foi previamente seco em estufa, sendo posteriormente a absorção do PCM realizada em ambiente controlado. No caso da absorção por imersão sem vácuo, o RCD foi imerso diretamente em PCM à pressão atmosférica durante períodos de 1 hora ou 4 horas. Relativamente à absorção de PCM por imersão com vácuo, o RCD foi colocado em vácuo, retirando todo o ar existente na amostra durante 3 horas.

Em seguida, o PCM foi introduzido com recurso a vácuo no RCD, durante períodos de 1 hora ou 4 horas. A Figura 1 apresenta os resultados obtidos deste processo de funcionalização do agregado reciclado, sendo possível verificar que não existe uma diferença significativa na quantidade de PCM absorvido utilizando os dois métodos de funcionalização. Portanto, considerando a operabilidade durante o processo construtivo e o consumo de energia durante o processo produtivo, considerou-se o método de imersão sob pressão atmosférica durante 4 horas como mais satisfatório para a preparação do RCD funcionalizado. A Figura 2 apresenta o RCD funcionalizado, com as características necessárias para ser incorporado em betões.

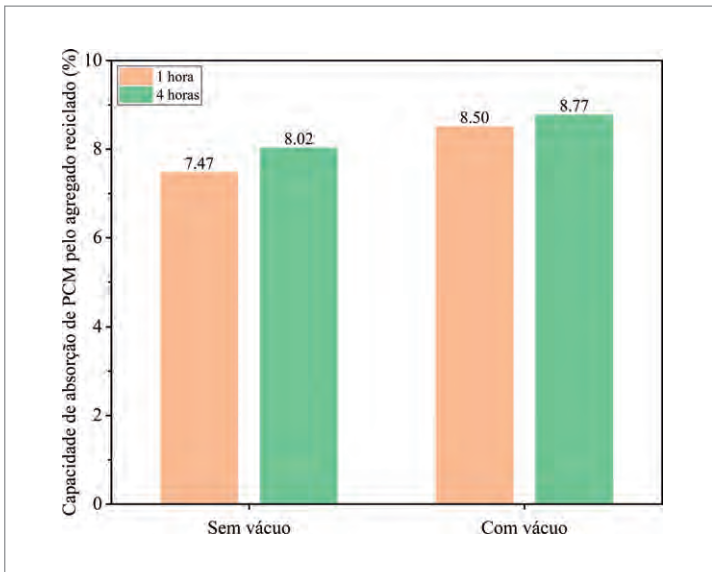


Figura 1: Capacidade de absorção de PCM pelo agregado reciclado.



Figura 2: RCD funcionalizado com PCM.

FORMULAÇÃO DOS BETÕES

No âmbito deste trabalho foram desenvolvidas várias composições de betão adotando uma classe de abaixamento S3. Foi desenvolvida uma composição de referência constituída apenas com agregado natural, duas composições com substituição do agregado grosso por RCD em diferentes teores (25% RCD e 75% RCD) e duas composições com substituição do agregado grosso por RCD funcionalizado com PCM em diferentes teores (25% RCD-PCM e 75% RCD-PCM).

A Figura 3 apresenta a quantidade de água utilizada para a produção dos diferentes betões. Foi possível observar que a incorporação de RCD no betão originou um aumento na quantidade de água necessário à saturação dos agregados, provocando também um aumento na água total utilizada na sua formulação. Este comportamento encontra-se associado à maior capacidade de absorção de água dos RCD. Contudo, nos betões com incorporação de RCD funcionalizado com PCM, foi possível verificar que à medida que o teor de RCD funcionalizado aumenta, o consumo total de água diminui. Este comportamento pode ser justificado pelo facto do RCD após ter sido imerso e saturado com PCM, apresentar uma superfície coberta com o material de mudança de fase, o que reduz bastante o atrito entre os agregados funcionalizados e os restantes constituintes do betão, favorecendo o seu abaixamento.

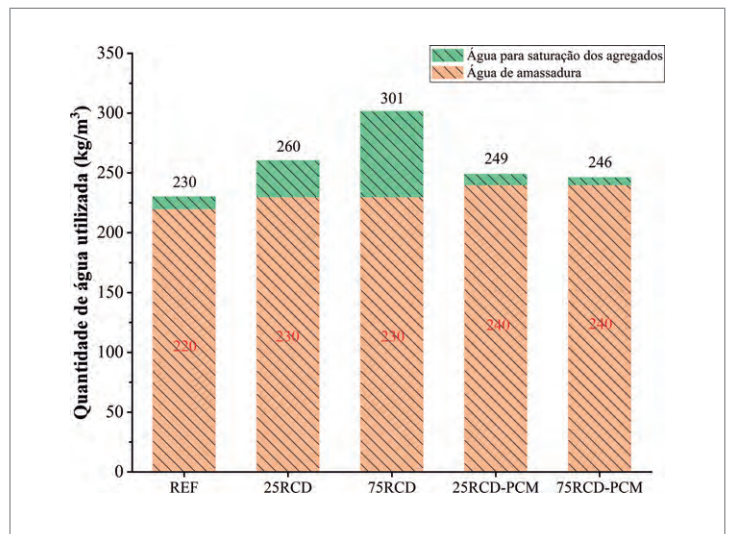


Figura 3: Dosagem de água utilizada para a produção dos betões.

MASSA VOLÚMICA DE BETÕES

A Figura 4 apresenta a massa volúmica seca das diferentes composições de betão desenvolvidas. Observa-se que, à medida que se aumenta a substituição de agregado grosso por RCD, a massa volúmica do betão apresenta uma tendência para diminuir, sendo que esta diminuição é mais expressiva para composições com maiores teores de RCD. A incorporação de agregado reciclado funcionalizado com PCM no betão origina também uma diminuição na massa volúmica seca dos betões. Este comportamento encontra-se associado à menor massa volúmica do agregado funcionalizado com PCM, comparativamente ao RCD saturado com água, tendo em consideração a baixa massa volúmica do PCM.

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

A Figura 5 apresenta a capacidade de absorção de água por imersão dos diferentes betões, sendo este um fator crucial para a sua durabilidade e desempenho. A substituição progressiva de agregado de grandes dimensões por RCD resultou num aumento na absorção de água por imersão, devido à maior capacidade de absorção do RCD. No entanto, observou-se uma mitigação deste efeito quando o RCD funcionalizado foi incorporado. Esta diminuição pode ser atribuída à capacidade do PCM em preencher os poros do RCD, reduzindo assim a conectividade dos poros no betão, o que por sua vez limita a penetração da água. Estes resultados indicam não apenas a viabilidade da utilização de RCD como substituto parcial do agregado de grandes dimensões no betão, mas também destacam os benefícios da funcionalização do RCD com PCM, especialmente em relação à durabilidade do betão.

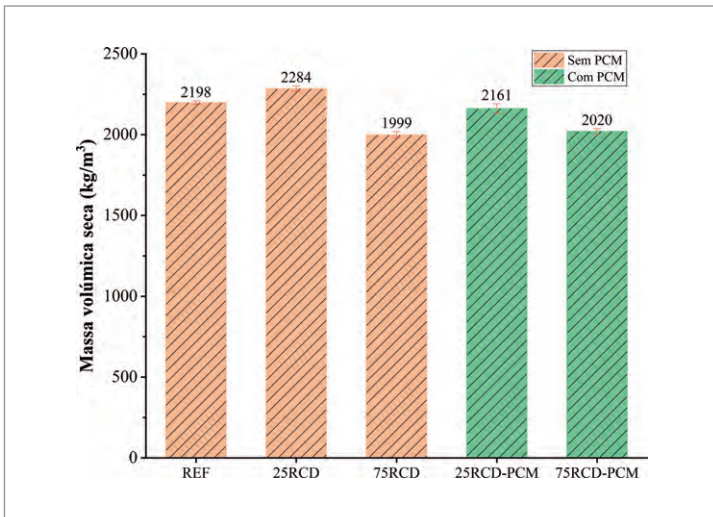


Figura 4: Massa volúmica dos betões desenvolvidos.

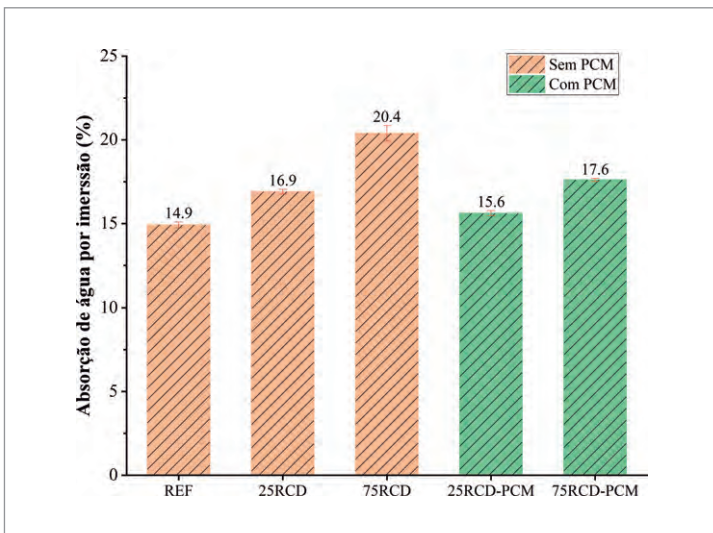


Figura 5: Absorção de água por imersão dos betões desenvolvidos.

Resistência à compressão

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos, evidenciando que os betões contendo RCD demonstram uma resistência à compressão ligeiramente superior em comparação com os betões com incorporação de RCD funcionalizado com PCM, após 28 dias de cura. Contudo, o betão de referência apresenta a resistência à compressão mais elevada para todos os betões analisados. Este decréscimo na resistência à compressão para os betões com substituição de agregado grosso por RCD é um reflexo da composição mais complexa do resíduo, resultando em propriedades mecânicas inferiores às do agregado natural. Além disso, a presença de um maior teor efetivo de água também contribui para uma maior porosidade, fragilizando o comportamento mecânico. Por sua vez a incorporação de RCD funcionalizado com agregado, proporciona também uma diminuição da resistência mecânica, comparativamente à incorporação de RCD no estado puro. Este comportamento pode ser atribuído à dificuldade de aderência da matriz do betão aos agregados aditivados com PCM. Durante o processo de imersão do RCD, parte do PCM é absorvido, contudo existe uma camada de PCM que envolve a superfície externa do agregado reciclado, dificultando a ligação da matriz cimentícia às partículas de agregado reciclado funcionalizado. Esse fenômeno é acentuado pela presença de um teor mais elevado de agregado reciclado na composição do betão, o que amplifica a dificuldade de ligação entre os diferentes componentes da mistura.

Estas observações ressaltam não apenas a influência da composição dos materiais utilizados na resistência do betão, mas também a importância da adequada aderência entre a matriz cimentícia e os agregados, de forma a garantir um desempenho mecânico satisfatório. Estes resultados contribuem para uma compreensão mais abrangente do comportamento dos betões contendo RCD e PCM.

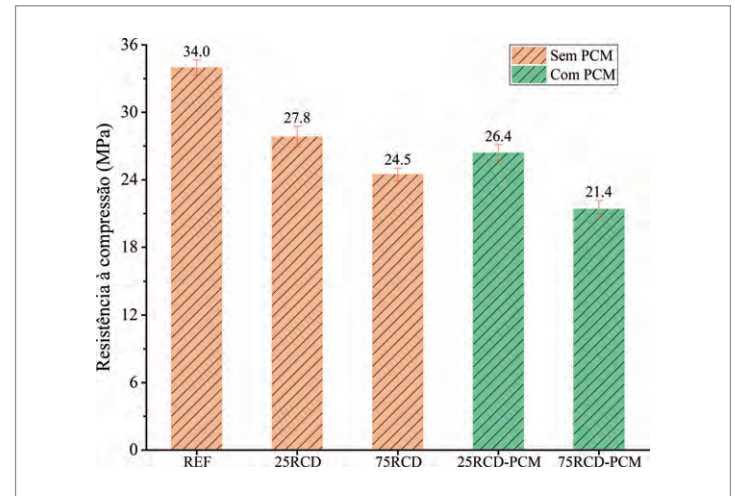


Figura 6: Resistência à compressão dos betões desenvolvidos.

Resistência à penetração de íons cloreto

A Figura 7 revela os resultados do coeficiente de difusão de cloretos no regime não estacionário (D_{NSSM}). É evidente que, à medida que a proporção de RCD aumenta, o D_{NSSM} do betão também aumenta, indicando uma diminuição na sua capacidade de resistência à penetração de íons cloreto. Por outro lado, à medida que o teor de RCD funcionalizado com PCM aumenta, observa-se a tendência oposta, com uma redução no D_{NSSM} do betão. Este comportamento pode ser atribuído ao facto do RCD funcionalizado com PCM, se encontrar saturado. Desta forma, o PCM presente nos poros do RCD funcionalizado atua como uma barreira adicional, dificultando ainda mais a migração dos íons cloreto. Este comportamento representa uma vantagem significativa para a utilização dos betões desenvolvidos neste estudo em regiões costeiras, onde a exposição aos íons cloreto é mais severa, contribuindo para uma maior durabilidade e desempenho dos elementos estruturais. Estes resultados têm implicações importantes para a indústria da construção civil, oferecendo uma abordagem promissora para a criação de betões mais resilientes em ambientes marinhos e costeiros. A Figura 8 apresenta a profundidade de penetração dos cloretos para os betões com incorporação de 25% de RCD puro e 25% de RCD funcionalizado com PCM.

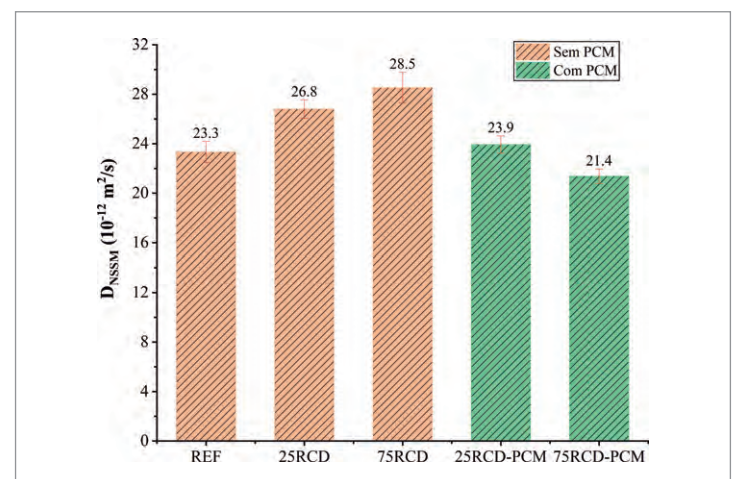


Figura 7: Coeficiente de difusão no estado não estacionário dos betões desenvolvidos.



Figura 8: Profundidade de penetração de cloretos: a) betão com incorporação de 25% de RCD; b) betão com incorporação de 25% de RCD funcionalizado com PCM.

CARBONATAÇÃO

A Figura 9 apresenta os resultados da profundidade da carbonatação dos betões em estudo. Uma descoberta notável é que, ao utilizar 75% de RCD funcionalizado com PCM, a profundidade de carbonatação do betão aos 180 dias permanece nula, indicando que este tipo de betões pode alcançar completa resistência à deterioração causada pela reação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono, evitando a corrosão das armaduras em peças de betão armado. Este comportamento benéfico da incorporação de RCD funcionalizado na profundidade de carbonatação do betão deve-se à natureza do PCM, uma vez que se trata de um PCM de natureza orgânica, sendo uma parafina e apresentando excelentes propriedades de neutralização da penetração do dióxido de carbono, aumentando ainda a resistência do betão à carbonatação. Este efeito é mais evidente à medida que um maior teor de RCD funcionalizado com PCM é incorporado na formulação do betão.

Contudo, ao observar o comportamento dos betões com incorporação de RCD não funcionalizado foi possível verificar um aumento na profundidade de carbonatação, evidenciando um comportamento mais frágil sob este tipo de agressão. Esse fenómeno pode ser justificado pela maior porosidade do RCD, o que resulta num aumento do teor de poros conectados no betão, facilitando a penetração do dióxido de carbono neste tipo de betões. Estas conclusões ressaltam a importância da escolha adequada dos materiais na formulação do betão, especialmente no que diz respeito à resistência à carbonatação. A inclusão de RCD funcionalizado com PCM pode representar uma estratégia eficaz para melhorar a durabilidade do betão em ambientes suscetíveis à carbonatação. A Figura 10 apresenta a profundidade de carbonatação para os betões com incorporação de 75% de RCD e 75% de RCD funcionalizado com PCM aos 180 dias de ensaio.

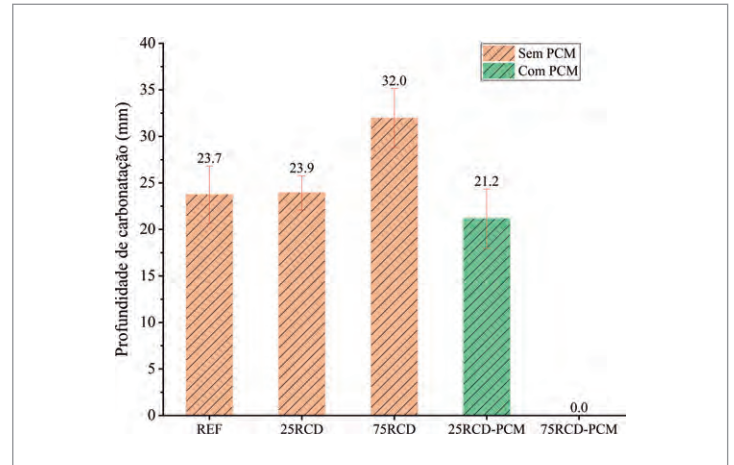


Figura 9: Profundidade da carbonatação dos betões desenvolvidos.

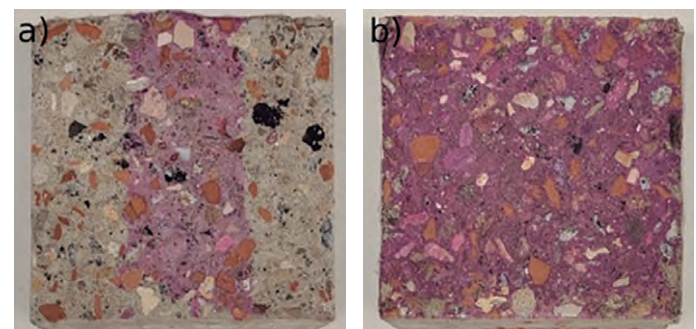


Figura 10: Profundidade de carbonatação: a) betão com incorporação de 75% de RCD; b) betão com incorporação de 75% de RCD funcionalizado com PCM.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo contribuiu significativamente para o avanço do conhecimento no campo dos materiais de construção sustentáveis, fornecendo contributos valiosos para o desenvolvimento de betões mais eficientes, mais sustentáveis e acima de tudo mais duráveis.

Em suma, este estudo abordou a incorporação de resíduos de construção e demolição funcionalizados com materiais de mudança de fase no betão, visando melhorar a sua eficiência e durabilidade, enquanto aborda questões importantes na indústria da construção, como a gestão de recursos naturais, gestão de resíduos e eficiência energética. Tendo sido possível observar que a funcionalização do RCD com PCM resultou em melhorias significativas em várias propriedades dos betões desenvolvidos.

Em termos de propriedades físicas, observou-se que a adição de RCD funcionalizado com PCM resultou em uma redução no consumo total de água do betão, mantendo a sua trabalhabilidade.



Somos a escolha dos profissionais há 69 anos.

Obrigado a todos pela confiança!



Além disso, a incorporação de RCD funcionalizado levou a uma diminuição na massa volúmica do betão, o que pode ser atribuído à menor densidade dos agregados funcionalizados.

No que diz respeito às propriedades mecânicas, verificou-se que a resistência à compressão do betão foi afetada negativamente pela presença de RCD funcionalizado, especialmente nas misturas com maior teor de RCD. No entanto, a resistência à penetração de iões cloreto aumentou significativamente com a adição de RCD funcionalizado, indicando uma maior durabilidade em ambientes agressivos, especialmente em ambientes costeiros. Também a resistência à carbonatação foi significativamente melhorada com a incorporação de RCD funcionalizado com PCM, resultando em menores profundidades carbonatação, comparativamente com betões contendo RCD ou agregado natural.

Desta forma, a funcionalização do RCD com PCM apresenta potencial para melhorar significativamente algumas propriedades do betão, principalmente as relacionadas com a durabilidade. Estes resultados têm implicações importantes para a indústria da construção, fornecendo uma abordagem promissora para enfrentar desafios contemporâneos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), no âmbito da bolsa de doutoramento com referência UI/BD/152844/2022.

REFERÊNCIA

[1] G.A. Aguilar-Hernandez, S. Deetman, S. Merciai, J.F.D. Rodrigues, A. Tukker, Global distribution of material inflows to in-use stocks in 2011 and its implications for a circularity transition, *Journal of Industrial Ecology*, 25 (2021) 1447–1461.

[2] X. Zhao, R. Webber, P. Kalutara, W. Browne, J. Pienaar, Construction and demolition waste management in Australia: A mini-review, *Waste Management and Research*, 40 (2022) 34–46.

[3] Y. Zhang, W. Tan, Demolition waste recycling in China: New evidence from a demolition project for highway development, *Waste Management and Research*, 38 (2020) 696–702.

[4] The time of India, <https://timesofindia.indiatimes.com/business/articleshowprint/77747060.cms>, acesso em 20/02/2024.

[5] International Energy Agency (IEA), Energy efficiency 2018. www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm, acesso em 20/02/2024.

[6] China association of building energy efficiency, China Building Energy Research Report 2020. 2020.

[7] Z. Li, Y. Lu, R. Huang et al., Applications and technological challenges for heat recovery, storage and utilisation with latent thermal energy storage, *Applied Energy*, 283 (2021) e116277.

[8] A. M. Matos, J. Delgado, A. Guimarães, Energy-Efficiency Passive Strategies for Mediterranean Climate: An Overview, *Energies*, 15 (2022) e2572.

[9] S. Cunha, J. Aguiar, Phase change materials and energy efficiency

of buildings: A review of knowledge, *Journal of Energy Storage*, 27 (2020) e101083.

[10] S. Cunha, P. Leite, J. Aguiar, Characterization of innovative mortars with direct incorporation of phase change materials, *Journal of Energy Storage*, 30 (2020) e101439.

[11] S. Cunha, M. Lima, J. Aguiar, Influence of adding phase change materials on the physical and mechanical properties of cement mortars, *Construction and Building Materials*, 127 (2016) 1–10.

[12] K. Cellat, B. Beyhan, B. Kazanci, Y. Konuklu, H. Paksoy, Direct Incorporation of Butyl Stearate as Phase Change Material into Concrete for Energy Saving in Buildings, *Journal of Clean Energy Technologies*, 5 (2017)64–68.

[13] L. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, O. Zubillaga, Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, *Energy and Buildings*, 39 (2007)113–119.

[14] M. Bahrar, Z. I. Djamaï, M. EL Mankibi, A. Si Larbi, M. Salvia, Numerical and experimental study on the use of microencapsulated phase change materials (PCMs) in textile reinforced concrete panels for energy storage, *Sustainable Cities and Society*, 41 (2018)455–468.

[15] K. Faraj, M. Khaled, J. Faraj, F. Hachem, C. Castelain, Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119 (2020), e109579.

[16] N. Kumar, S. K. Gupta, V. K. Sharma, Application of phase change material for thermal energy storage: An overview of recent advances, *Materials Today: Proceedings*, 44 (2021) 368–375.