

## Influência da incorporação de resíduos de construção e demolição funcionalizados com material de mudança de fase nas propriedades mecânicas de betões

Influence of the incorporation of construction and demolition waste functionalized with phase change material on the mechanical properties of concrete

Z.Y. Jia<sup>a†</sup>, S. Cunha<sup>a</sup>, J. Aguiar<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal*

<sup>†</sup> *Autor para correspondência: pg39237@uminho.pt*

### RESUMO

O crescimento das urbanizações levou ao rápido desenvolvimento da indústria da construção, originando uma grande quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD) e em simultâneo um aumento nos consumos energéticos e emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para a atmosfera. A aplicação simultânea de RCD e tecnologias de calor latente incorporadas em betões permite a reutilização de agregados reciclados, mas também minimizar o consumo de energia durante o período de utilização do edifício. Este estudo tem como principal objetivo a avaliação da incorporação de material de mudança de fase (PCM) em agregado reciclado proveniente de RCD, utilizado em substituição do agregado natural para a produção de betões, assim como a avaliação do comportamento mecânico dos betões produzidos. A incorporação de PCM no agregado reciclado foi efetuada segundo duas técnicas distintas, a vácuo e a pressão atmosférica, sendo produzidos betões com os diferentes agregados. Foi possível verificar que a presença do agregado reciclado dopado com PCM afetou negativamente o desempenho mecânico das diferentes formulações de betão desenvolvidas.

### ABSTRACT

The growth of urbanization has led to the rapid development of the construction industry, resulting in a large amount of construction and demolition waste (CDW) and, at the same time, an increase in energy consumption and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions into the atmosphere. The simultaneous application of CDW and latent heat technologies incorporated into concrete allows for the reuse of recycled aggregates while also minimizing energy consumption during the building's use period. The main objective of this study is to evaluate the incorporation of phase change material (PCM) in recycled aggregates from CDW, used to replace natural aggregates in concrete production, as well as to evaluate the mechanical behaviour of the produced concrete. The incorporation of PCM in recycled aggregates was carried out using two different techniques, vacuum and atmospheric pressure, and concrete was produced with the different aggregates. It was possible to verify that the presence of recycled aggregate doped with PCM negatively affected the mechanical performance of the different developed concrete formulations.

### Palavras-chave:

Betão térmico, Resíduos de construção e demolição, Material de Mudança de Fase, resistência à compressão.

### Keywords:

Thermal concrete, construction and demolition waste, phase change materials, compressive strength.

## 1. Introdução

O rápido crescimento da população mundial e o desenvolvimento das urbanizações levaram ao rápido desenvolvimento da indústria da construção, originando também uma grande quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD). A produção mundial de resíduos sólidos tem vindo a aumentar significativamente, passando de uma quantidade inferior a 0.3 milhões de toneladas (Mt.) por dia em 1900, para mais de 3.5 Mt. por dia em 2010, prevendo-se ainda que possa vir a duplicar em 2025 e a triplicar em 2100 [1]. O simples tratamento em aterro sanitário dos RCD tem causado uma elevada poluição ambiental e danos ecológicos, de modo que o tratamento racional e a reutilização de recursos de RCD tornaram-se um tema importante para a indústria da construção e para a comunidade científica. Até ao momento, a Europa, os Estados Unidos da América, o Japão e a Coreia do Sul possuem uma política de gestão e reutilização de recursos relativos aos RCD já implementada [2]. Contudo, países em desenvolvimento como a China e a Índia ainda apresentam uma taxa de utilização destes resíduos muito baixa, sendo de 5% a 10% [3] e de 1% [4], respetivamente.

As estatísticas da equipa do investigador Chen [5] e da equipe do Banco Mundial [6], reportaram um rápido desenvolvimento da urbanização global, especialmente no que diz respeito à taxa de urbanização da China que aumentou de cerca de 18% em 1978 para 64% em 2020 e também nos Estados Unidos da América e na União Europeia cuja taxa de urbanização é cerca de 83% e 75% em 2020, respetivamente. Associado ao desenvolvimento da urbanização global encontra-se também o rápido desenvolvimento do setor de construção e em consequência uma elevada produção de resíduos de construção e demolição e consumos energéticos. A China, os Estados Unidos da América e a UE (União Europeia 28 países) têm vindo a apresentar a maior produção anual de RCD em todo mundo [7], no entanto, em 2018, a taxa de utilização desses recursos na China foi de apenas 10% [8], muito inferior aos 76% [9] e 90% [10] dos Estados Unidos da América e da UE. Por muito tempo, a China adotou métodos simples de acumulação e disposição em aterros de RCD, que levaram à ocupação de muito espaço e desperdiçaram muitos recursos, destruindo também o meio ambiente. Diante desta problemática, como tratar e regenerar de forma abrangente os RCD, este tornou-se um assunto de elevado interesse e importância no sector de construção. Segundo Elshaboury et al. [11], de 2001 a 2021, um total de 895 artigos académicos foram publicados sobre RCD, e seu campo de aplicação envolveu estradas, tijolo/bloco, betão, argamassa, etc. Vários trabalhos têm sido desenvolvidos reutilizando RCD como agregado em betão [12, 13, 14, 15, 16, 17]. Zheng et al. [18] desenvolveram um estudo no qual efetuaram a substituição de agregado natural nos teores de 0, 25, 50, 75 e 100% por agregado de betão reciclado e agregado de tijolo reciclado, com tamanho de partícula compreendido entre 4 a 32.5 mm em betão C25, com a relação de água/ligante de 0.55 e betão C50, com a relação de água/ligante de 0.35. Os resultados obtidos permitiram observar que o aumento do teor de agregado reciclado originou uma diminuição na resistência do betão.

Por outro lado, os consumos energéticos são cada vez mais significativos, as fontes de energia não renováveis, como o petróleo e o gás natural, estão cada vez mais esgotadas e a crise energética é cada vez mais grave [19]. Tendo, também sido recentemente agravada pelos graves conflitos internacionais, sem precedentes, a que temos assistido. Tyagi [20] apontou que os sistemas de aquecimento e arrefecimento dos edifícios consomem 40% de energia, enquanto produzem uma grande quantidade de emissões de carbono. A Agência Internacional de Energia (IEA) [21] informou que o consumo total de energia para aquecimento, arrefecimento e produção de água quente nos edifícios em todo o mundo em 2017 foi de cerca de  $10^{15}$  kJ, representando cerca de 20% do consumo global de energia. A maior contribuição para o consumo mundial de energia em edifícios são as economias emergentes como a China, o Brasil, a Índia entre outros países. Entre eles, de acordo com as estatísticas do Comitê de Estatísticas de Consumo de Energia da Associação de Conservação de Energia de Edifícios da China [22], o consumo nacional de energia na fase de operação dos edifícios em 2018 foi de  $2.93 \times 10^{16}$  kJ, cerca de 21.7% do consumo nacional de energia, e as emissões de dióxido de carbono foram de 2.1 bilhões de toneladas, correspondendo a cerca de 22% do total das emissões do país. Desta forma, verifica-se também a necessidade de atuar nesta problemática do setor da construção, através da utilização de materiais funcionais, tais como os materiais de mudança de fase (PCM). O PCM é um material

baseado em energia verde [23]. Embora não possa gerar nenhuma forma de energia por si só, este pode usar o seu efeito térmico de mudança de fase para armazenar o calor perdido no ambiente externo na forma de calor latente e, liberar e utilizar a energia em condições adequadas para melhorar a eficiência energética dos edifícios [24, 25], substituindo em parte o recurso a combustíveis fósseis. Estes materiais podem ser utilizados como meio de armazenamento térmico para aquecimento solar passivo [25], podendo ser incorporados em argamassas [29, 30], placas de gesso cartonado [31, 32], betão [30, 31, 32], ou em tijolos e blocos [35, 36]. Portanto, a investigação e desenvolvimento de novos materiais de construção com capacidade de armazenamento de energia tem vindo a tornar-se numa questão de extrema importância para a comunidade científica, tendo como base a utilização eficiente de várias fontes de energia [19, 20], de modo a aliviar efetivamente a pressão causada pela perda de recursos provenientes de fontes não renováveis e a degradação ambiental.

O principal objetivo deste trabalho consistiu em combinar a tecnologia de calor latente e os RCD para preparar um betão térmico, avaliando-se a influência no estado fresco e endurecido dos betões, dos diferentes métodos de incorporação de PCM nos RCD. Assim, foram desenvolvidas várias formulações de betão com incorporação de diferentes teores RCD dopados com PCM. A incorporação de PCM nos RCD foi realizada com base em duas técnicas distintas, sendo estas a pressão atmosférica e o vácuo.

## 2. Procedimento Experimental

### 2.1. Matérias-primas

Neste trabalho foram utilizados agregados de origem natural (Areia e Brita) e agregado proveniente de resíduos de construção e demolição.

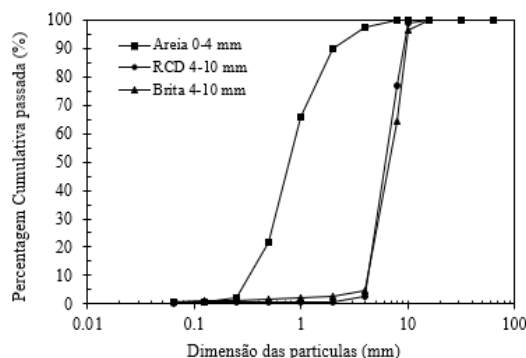
Os RCD (Figura 1) foram fornecidos pela empresa Resíduos de Construção e Demolição de Portugal, com dimensões entre 0 a 10 mm. De forma a se substituir a Brita de origem natural, o RCD foi peneirado de modo a separar as partículas com dimensões compreendidas entre 4 e 10 mm, (Figura 2). A massa volúmica das partículas secas e absorção de água do RCD foram determinados experimentalmente de acordo com a norma NP 581 [37], tendo-se obtido uma massa volúmica de 2134 kg/m<sup>3</sup> e uma absorção de água de 7.82%. A massa volúmica e absorção de água foram determinadas de acordo a mesma norma, sendo 2197 kg/m<sup>3</sup> e uma absorção de água de 0.51%, respetivamente. A areia do rio utilizada apresentou dimensões compreendidas entre 0-4 mm, de acordo com a norma NP 954 [38], a massa volúmica e absorção de água da areia do rio foram determinadas, sendo de 2563 kg/m<sup>3</sup> e de 1.19%, respetivamente.

O PCM selecionado foi uma parafina pura (PCM-PP) com temperatura de transição de cerca de 22 °C, comercialmente designada de RT22HC, proveniente da empresa RUBITHERM®, sediada na Alemanha. A Tabela 1 apresenta as principais características do material de mudança de fase. Foi medida a expansão volumétrica que o PCM-PP apresenta durante a mudança de fase, tendo-se verificado que esta representa 2.7%, o que não é suficiente para causar danos significativos ao agregado reciclado proveniente dos RCD.

O cimento selecionado é um CEM I 42.5R, com uma massa volúmica de 3120 kg/m<sup>3</sup>.



**Figura 1** - Resíduos de construção e demolição (RCD).



**Figura 2** - Curva granulométrica dos agregados.

**Tabela 1** - Os parâmetros deste PP (dados da empresa RUBITHERM®).

Características	Resultados
Temperatura de fusão	20-23 (°C)
Temperatura de solidificação	23-22 (°C)
Capacidade de armazenamento de calor	190 (kJ/kg)
Capacidade de calor específico	2 (kJ/kg·k)
Massa volúmica no estado sólido (20 °C)	0.76 (kg/L)
Massa volúmica no estado líquido (50 °C)	0.7 (kg/L)
Condutividade térmica	0.2 (W/(m·k))
Ponto de inflamação	>150 (°C)
Temperatura máxima de operação	50 (°C)

## 2.2. Funcionalização do agregado de RCD com PCM-PP

A absorção de PCM-PP pelo RCD foi realizada segundo dois métodos distintos, sendo estes, absorção à pressão atmosférica (Figura 3 a) e absorção a vácuo (Figura 3 b)). De forma a garantir uma correta absorção de PCM-PP pelo RCD, foi necessário garantir que o material de mudança de fase se encontra no estado líquido, pelo que este foi colocado numa estufa a uma temperatura de 35°C, durante 30 minutos anteriores à sua utilização. A temperatura selecionada para o acondicionamento do material teve em conta a temperatura de fusão do PCM-PP (22°C), de forma a garantir que todo o material se encontra no estado líquido. Para a técnica de absorção por imersão utilizando vácuo, o equipamento de contenção dos materiais foi também colocado no interior da estufa a 35°C, de forma a minimizar qualquer possibilidade do material de mudança de fase poder inicializar o seu processo de solidificação durante a funcionalização do agregado de RCD.



(a) Sem vácuo

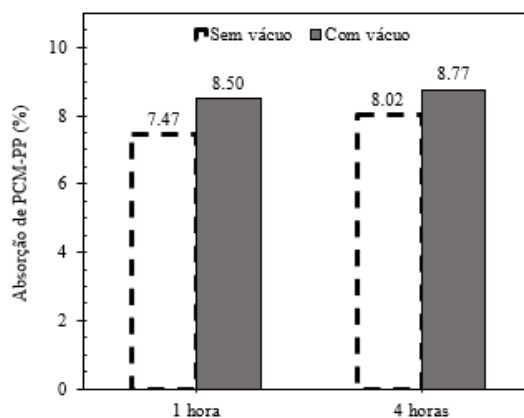


(b) Com vácuo

**Figura 3** - Absorção de PCM-PP pelo RCD.

De forma a garantir a máxima absorção de PCM-PP pelo RCD com dimensões de 4-10 mm, o material foi seco previamente em estufa a 105 °C durante 24 horas, eliminando a existência

de qualquer humidade, sendo posteriormente realizada a absorção do PCM-PP em ambiente controlado. Relativamente à absorção do PCM-PP pelo agregado reciclado por imersão a pressão atmosférica, as partículas de RCD foram imersas diretamente num recipiente com PCM líquido durante uma hora ou 4 horas. No caso da absorção de PCM-PP por imersão a vácuo, as partículas de RCD foram inicialmente colocadas em vácuo, retirando todo o ar existente na amostra durante 3 horas. Em seguida, o PCM foi introduzido com recurso a vácuo, sendo realizada uma amostra com introdução durante uma hora e uma segunda amostra com introdução de PCM a vácuo durante 4 horas, tal como realizada para a funcionalização do agregado à pressão atmosférica. A Figura 4 apresenta a absorção de PCM-PP pelo agregado reciclado, segundo os diferentes métodos e tempos de imersão.



**Figura 4** - Os resultados de absorção de PP do RCD.

Tal como se pode observar relativamente à imersão do agregado reciclado de RCD durante 1 hora em material de mudança de fase, a utilização de vácuo origina um aumento na absorção de PCM-PP de cerca de 14%, relativamente à absorção à pressão atmosférica. No que diz respeito à imersão do agregado em PCM-PP durante 4 horas a utilização de vácuo origina um aumento na absorção de cerca de 9%, em relação à absorção à pressão atmosférica. Efetuando uma comparação no que diz respeito ao tempo de imersão utilizado, pode ser observado que na utilização da absorção à pressão atmosférica a imersão durante 4 horas origina um aumento de cerca de 7% em comparação com 1 hora de imersão. Na técnica de absorção de PCM-PP a vácuo a imersão durante 4 horas originou um aumento na absorção de PCM-PP menos significativa, de apenas 3% comparando com uma hora.



**Figura 5** - RCD aditivado com PP (RCD-PP) com vácuo durante 4 horas.

### 2.3. Composições

Foram desenvolvidas sete composições distintas de betão com diferentes teores de agregado reciclado, sendo que o agregado foi funcionalizado com PCM-PP através dois métodos descritos anteriormente. A relação de água/ligante utilizado foi de 0.55. O betão referência, apenas com

incorporação de agregado natural e sem a presença de PCM-PP (REF) foi desenvolvido pelo método de Faury, de modo a obter a maior compactidade e melhor trabalhabilidade [39]. Foram ainda desenvolvidas duas composições com agregado reciclado sem incorporação de PCM-PP, com percentagens de incorporação de 40% e 80% da massa de brita (40RCD e 80RCD), duas composições com incorporação de agregado reciclado ativado com PCM à pressão atmosférica (40RCD-PP S/V e 80RCD-PP S/V) e duas composições com incorporação de agregado reciclado aditivado com PCM sob vácuo (40RCD-PP C/V e 80RCD-PP C/V). A Tabela 2 apresenta as diferentes composições de betão desenvolvidas.

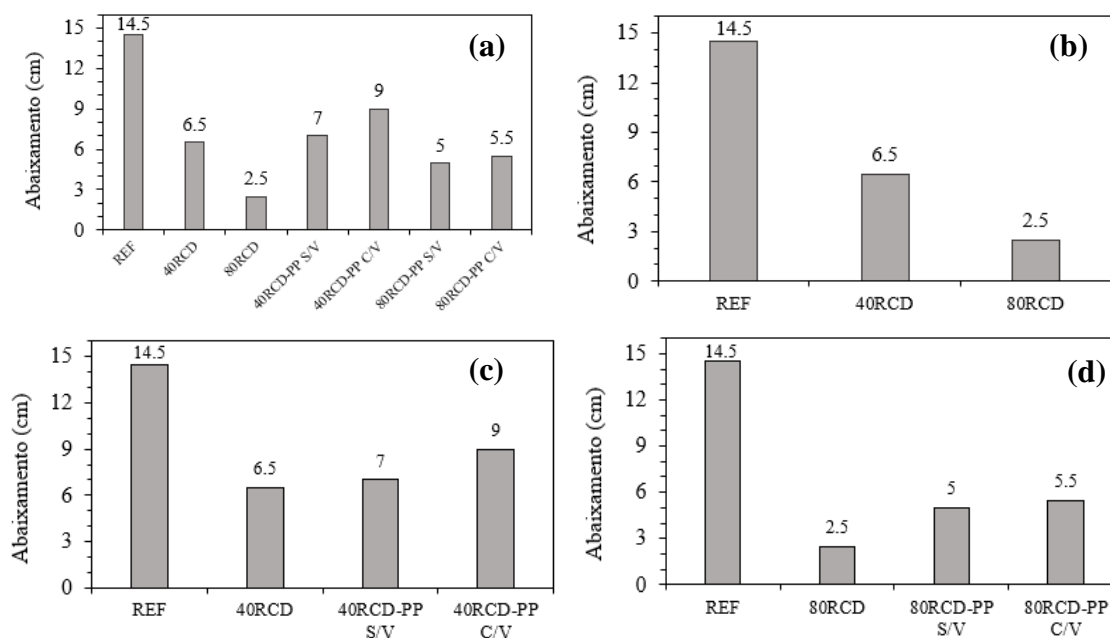
**Tabela 2** - Dosagem do betão (kg/m<sup>3</sup>).

Misturas	Cimento	Água	Areia 0/4	Brita 4/10	RCD 4/10	RCD-PP	PP %
REF	400	230	393	1035	-	-	0 %
40RCD	400	230	393	621	414	-	0 %
80RCD	400	230	393	207	828	-	0 %
40RCD-PP S/V	400	230	393	621	-	440	1.2 %
40RCD-PP C/V	400	230	393	621	-	446	1.5 %
80RCD-PP S/V	400	230	393	207	-	880	2.5 %
80RCD-PP C/V	400	230	393	207	-	892	3.0 %

### 3. Resultados

#### 3.1. Abaixamento

As classes do abaixamento do betão são divididas em cinco, como definidas na norma NP EN 206-1 2007 [40]. A Figura 6 (a) apresenta os resultados do ensaio de abaixamento das todas composições de betão desenvolvidos. A incorporação de RCD no betão origina uma diminuição no seu abaixamento, provocando também a diminuição de uma ou mais classes de abaixamento.

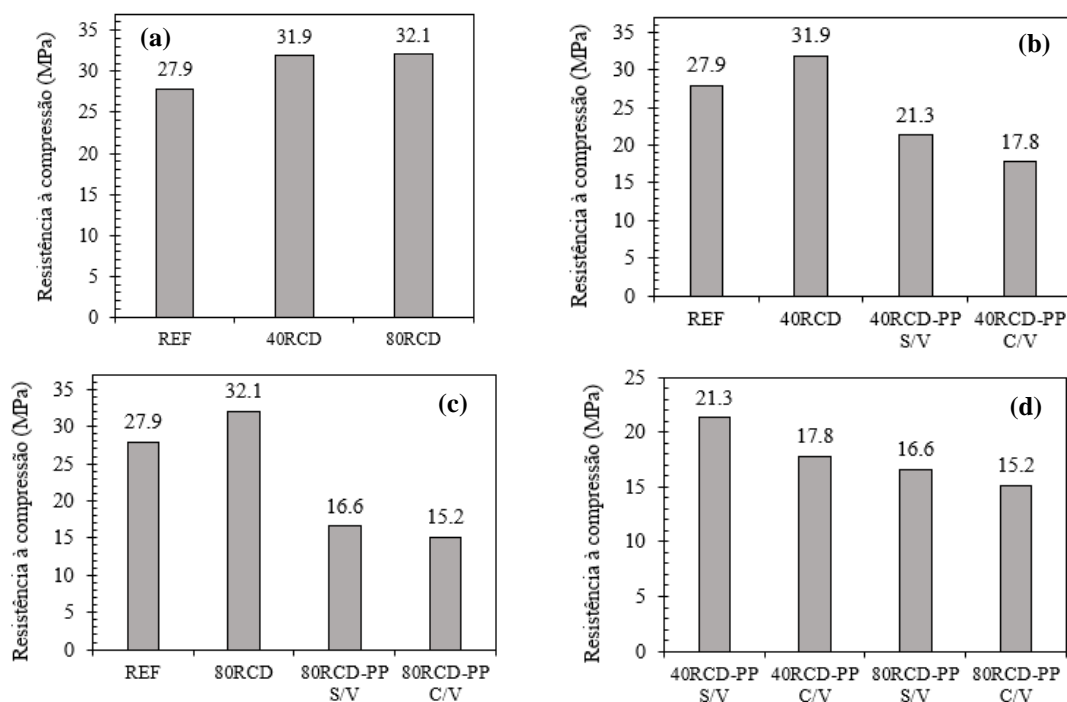


**Figura 4** - Abaixamento dos diferentes betões desenvolvidos.

#### 3.2. Resistência à compressão

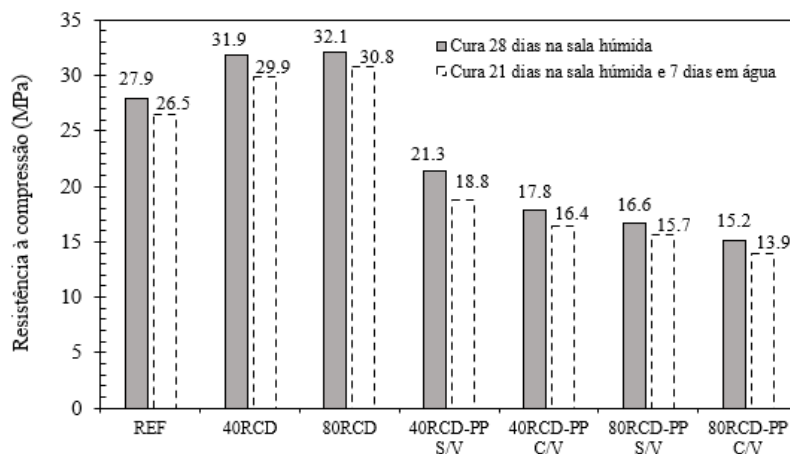
A resistência à compressão foi realizada com base na norma EN 12390-3 [41]. Inicialmente foram moldados 5 provetes cilíndricos para cada composição de betão, com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Foram testados dois métodos de cura, 3 provetes foram colocados em câmara húmida durante 28 dias e 2 provetes foram colocados em câmara húmida durante 21 dias

e 7 dias em imersão em água. A figure 7 mostrou-se a resistência à compressão dos betões curados na sala húmida.



**Figura 5** - Resistência à compressão dos betões curados na sala húmida.

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos, independentemente do tipo de cura, sendo possível observar que os betões com incorporação de agregado reciclado sem incorporação de PCM-PP apresentam uma maior resistência comparativamente aos betões com incorporação de agregado reciclado funcionalizado com PCM-PP.



**Figura 6** - Resistência à compressão dos todos betões desenvolvidos.

## 4. Discussão

### 4.1. Abaixamento

No que diz respeito à incorporação de agregado reciclado puro, ou seja, sem incorporação de PCM-PP (Figura 6 b)), verificou-se que a incorporação de 40% de agregado reciclado originou uma diminuição no abaixamento de cerca de 55% relativamente à composição de referência,

obtendo-se uma classe de abaixamento S2 (5-9 cm). Relativamente à incorporação de 80% de agregado reciclado puro verificou-se uma diminuição no abaixamento de cerca de 83%, tendo a classe de abaixamento caído 2 classes e apresentando-se como uma S1 (1-4 cm). Este comportamento pode ser justificado pela forma mais irregular e pelas pequenas partículas soltas na superfície características deste tipo de agregados.

Por outro lado, quando se efetua uma comparação com o betão com agregado reciclado puro (40RCD e 80RCD) e com agregado reciclado com incorporação de PCM por imersão à pressão atmosférica (40RCD-PP S/V e 80RCD-PP S/V) ou por vácuo (40RCD-PP C/V e 80RCD-PP C/V) (Figura 6 c) e 6 d)) foi possível verificar uma tendência para o aumento no abaixamento, originando até o aumento de uma classe de abaixamento em algumas situações. Todos os betões com incorporação de agregado reciclado com incorporação de PCM apresentam uma classe de abaixamento S2. Este comportamento pode ser justificado pelo facto que o RCD após ter sido embebido em PCM, a sua superfície fica limpa e parte da sua área fica coberta com PCM (Figura 5), o que reduz bastante o atrito entre os agregados, conseguindo-se assim este efeito de aumento do abaixamento.

Relativamente à composição com 40% de agregado reciclado (40RCD-PP S/V) e comparativamente à composição 40RCD este aumento foi de cerca de 8% e na composição com 80% de agregado reciclado (80RCD-PP S/V) comparativamente com a composição 80RCD este aumento foi de 100% (Figura 6 c) e 6d)). Por sua vez, os betões aditivados com agregado reciclado dopados com PCM por imersão a vácuo apresentam um aumento de cerca de 38% para o betão 40RCD-PP C/V comparativamente à composição 40RCD e de 120% para o betão 80RCD-PP C/V comparativamente à composição 80RCD.

Por último, efetuando uma análise comparativa entre as composições aditivadas com agregado reciclado aditivado com PCM por imersão a vácuo em relação às composições aditivadas com agregado reciclado aditivado com PCM por imersão à pressão atmosférica verificou-se que a técnica de vácuo conduziu a maiores valores de abaixamento, tendo o abaixamento aumentado cerca de 29% para as composições com 40% de agregado reciclado e cerca de 10% para as composições com cerca de 80% de agregado reciclado.

Neste trabalho, de todas as misturas de betões com agregado funcionalizado com PCM-pp, embora o betão 80RCD-PP C/V tenha incorporado a maior quantidade de PCM, o seu abaixamento ainda foi inferior o betão de 40RCD-PP S/V. Este comportamento pode ser explicado pela quantidade total de agregado reciclado incorporada ser o principal fator que afeta o abaixamento de betão fresco. No entanto, o agregado funcionalizado com PCM-PP apresenta vantagens óbvias na otimização do abaixamento do betão fresco com 80% de RCD (80RCD), o que pode aumentar o abaixamento.

#### *4.2. Resistência à compressão*

Comparativamente com o betão de referência foi possível observar (Figura 7 a)), que o betão com incorporação de 40% e 80% de agregado reciclado não funcionalizado (40RCD e 80RCD), apresentam um aumento na resistência à compressão superior a 13% e 15%, respetivamente e independentemente da cura.

No que diz respeito à incorporação de 40% de RCD, verificou-se uma diminuição da resistência à compressão do betão 40RCD-PP S/V superior a 33% com a incorporação do agregado reciclado funcionalizado com PCM-PP (Figura 7 b)). Este comportamento pode ser justificado pela dificuldade de ligação da matriz do betão aos agregados dopados com PCM-PP, uma vez que durante o processo de imersão parte do PCM-PP envolve a superfície externa do agregado. Na Figura 7 c), o mesmo comportamento foi identificado relativamente à incorporação de 80% de agregado reciclado funcionalizado (80RCD-PP S/V), tendo-se verificado uma diminuição da resistência à compressão superior a 48%. Este comportamento é justificado pela presença de um maior teor de PCM-PP presente no agregado, o que pode dificultar em maior escala a ligação da matriz cimentícia às partículas de agregado reciclado.

A Figura 7 b) e c), apresenta a resistência à compressão obtida com diferentes técnicas de incorporação PCM-PP. Foi possível observar uma diminuição da resistência à compressão em cerca de 16% e 8%, para uma incorporação de 40% e 80% de agregado reciclado funcionalizado



com PCM-PP, respetivamente. Estes resultados demonstram que o teor de incorporação de agregado reciclado de RCD funcionalizado com PCM-PP afeta negativamente a resistência à compressão do betão em qualquer das técnicas de incorporação de PCM-PP utilizadas (Figura 8 d)).

Na Figura 8, em todas as composições de betão analisadas verificou-se que na cura de betão com 21 dias em sala húmida e 7 dias imersos em água a resistência à compressão diminuiu em média cerca de 7% comparando com os betões curados 28 dias em sala húmida. O betão curado 28 dias em sala húmida apresentou a resistência à compressão prevista.

## 5. Conclusões

Este artigo considera a tentativa de combinar o reaproveitamento de resíduos de construção e demolição como substituto do agregado natural em betões, funcionalizando-os com o material de mudança de fase. Desta forma, são abordadas três das principais temáticas, que atualmente mais preocupam os técnicos da indústria da construção, sendo esta a gestão eficiente dos recursos naturais, a gestão dos resíduos de construção e demolição e aumento da eficiência energética dos edifícios. Contudo, a incorporação de agregado reciclado funcionalizado com PCM-PP não encapsulado em betões altera as suas principais propriedades, nomeadamente o abaixamento e a resistência à compressão.

Relativamente ao processo de funcionalização do agregado reciclado foi possível concluir que apresentaram uma boa taxa de absorção de material de mudança de fase e pouca variação volúmica, independentemente do método de incorporação utilizado (pressão atmosférica e vácuo).

No que diz respeito ao abaixamento verificado nos betões desenvolvidos, a incorporação de agregado reciclado originou uma diminuição do mesmo, provocando também a diminuição de uma ou mais classes de abaixamento. Sendo que este comportamento pode ser justificado pela forma mais irregular e pelas pequenas partículas soltas na superfície do agregado reciclado de RCD não funcionalizado e pelo facto da sua superfície do agregado funcionalizado com PCM-PP ficar coberta com PCM, reduzindo o atrito entre os agregados e os restantes constituintes do betão.

Por último, no que confere à resistência à compressão foi possível concluir os betões com incorporação de agregado reciclado funcionalizado com PCM-PP apresentam um menor desempenho, justificado pela maior dificuldade de ligação da matriz cimentícia às partículas de agregado reciclado com PCM.

## 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.

## Referências

- [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. <https://doi.org/10.1111/jiec.13179>.
- [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. <https://doi.org/10.1177/0734242X211029446>.
- [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. <https://doi.org/10.1177/0734242X20904440>.

- [4] The time of India, India recycles only 1% of construction and demolition waste, study finds, (2020) 2. <https://timesofindia.indiatimes.com/business/articleshowprint/77747060.cms>, (acesso em 10 setembro 2022).
- [5] X. Chen, C. Liu, X. Yu, Urbanization, Economic Development, and Ecological Environment: Evidence from Provincial Panel Data in China, *Sustainability (Switzerland)*. 14 (2022) 1–15. <https://doi.org/10.3390/su14031124>.
- [6] World bank group, Urban population (% of total population), The World Bank. (2020) 1. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS?view=map>, (acesso em 13 setembro 2022).
- [7] C. Zhang, M. Hu, F. Di Maio, B. Sprecher, X. Yang, A. Tukker, An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe, *Science of the Total Environment*. 803 (2022) 13. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149892>.
- [8] B. Huang, X. Wang, H. Kua, Y. Geng, R. Bleischwitz, J. Ren, Construction and demolition waste management in China through the 3R principle, *Resources, Conservation and Recycling*. 129 (2018) 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.029>.
- [9] Construction and Demolition Debris: Material-Specific Data, United States Environmental Agency. (2021) 2. <https://www.epa.gov>, (acesso em 15 setembro 2022).
- [10] Recovery rate of construction and demolition waste, Statistics Eurostat. (2022) 1. [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei\\_wm040/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm040/default/table?lang=en). (acesso em 15 setembro 2022).
- [11] N. Elshaboury, A. Al-sakkaf, E.M. Abdelkader, G. Alfalah, Construction and Demolition Waste Management Research : A Science Mapping Analysis, *Environmental Research and Public Health*. 19 (2022) 25. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084496>.
- [12] M. Abed, R. Nemes, B.A. Tayeh, Properties of self-compacting high-strength concrete containing multiple use of recycled aggregate, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 32 (2020) 108–114. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.125>.
- [13] B.S. Hamad, A.H. Dawi, Case Studies in Construction Materials Sustainable normal and high strength recycled aggregate concretes using crushed tested cylinders as coarse aggregates, *Case Studies in Construction Materials*. 7 (2020) 228–239. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.08.006>.
- [14] V.S. Babu, A.K. Mullick, K.K. Jain, P.K. Singh, Strength and durability characteristics of high- strength concrete with recycled aggregate- influence of processing, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 4 (2015) 55–76. <http://dx.doi.org/10.1080/21650373.2014.976777>.
- [15] A.I. Tijani, J. Yang, S. Dirar, Enhancing the Performance of Recycled Aggregate Concrete with Microsilica, *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*. 4 (2015) <http://dx.doi.org/7.10.18178/ijscer.4.4.347-353>.
- [16] A. Australian, E. Congress, Recycled Aggregate as Coarse Aggregate Replacement in Concrete Mixes, *ASEAN Australian Engineering Congress 2011*. (2011) 9. <http://dx.doi.org/10.18178/ijscer.4.4.347-353>.
- [17] S. Kou, C. Poon, H. Wan, Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates C & D Waste, *Construction and Building Materials*. 36 (2012) 881–889. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.060>.
- [18] C. Zheng, C. Lou, G. Du, X. Li, Z. Liu, L. Li, Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate, *Results in Physics*. 9 (2018) 6. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.04.061>.

- [19] P. Limei, Ma; Dan, Shi; Qingbin, Low-carbon transformation of China's energy in 2015—2050:renewable energy development and feasible path, *China Population,Resources and Environment*. 2 (2018) 8–18.
- [20] V. V. Tyagi, K. Chopra, B. Kalidasan, A. Chauhan, U. Stritih, S. Anand, A.K. Pandey, A. Sari, R. Kothari, Phase change material based advance solar thermal energy storage systems for building heating and cooling applications: A prospective research approach, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 47 (2021) 44. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101318>.
- [21] I. (CCEEE), China council for an energy-efficient economy, *Energy efficiency 2018*, Beijing, 2018. [www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm](http://www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm), (acesso em 16 setembro 2022).
- [22] China association of building energy efficiency, *China Building Energy Research Report 2020*, Xiamen, China, 2020.
- [23] Z. Li, Y. Lu, R. Huang, J. Chang, X. Yu, R. Jiang, X. Yu, A.P. Roskilly, Applications and technological challenges for heat recovery, storage and utilisation with latent thermal energy storage, *Applied Energy*. 283 (2021) 23. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116277>.
- [24] P.K.S. Rathore, N.K. Gupta, D. Yadav, S.K. Shukla, S. Kaul, Thermal performance of the building envelope integrated with phase change material for thermal energy storage: an updated review, *Sustainable Cities and Society*. 79 (2022) 28. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103690>.
- [25] A.M. Matos, J.M.P.Q. Delgado, A.S. Guimarães, Energy-Efficiency Passive Strategies for Mediterranean Climate: An Overview, *Energies*. 15 (2022) 20. <https://doi.org/10.3390/en15072572>.
- [26] P.K.S. Rathore, S.K. Shukla, Enhanced thermophysical properties of organic PCM through shape stabilization for thermal energy storage in buildings: A state of the art review, *Energy and Buildings*. 236 (2021) 29. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110799>.
- [27] J. Yan, Study on thermal management system of power battery based on phase change heat dissipation, (2017) 160. <https://wap.cnki.net/touch/web/10358-1017073532.nh.html>, (acesso em 5 setembro 2022).
- [28] Athienitis A.; Liu C.; Hawes D.; Banu D.; Feldman D., Investigation of the Thermal Performance of a Passive Solar Test-Room with Wall Latent Heat Storage, *Athienitis A, Liu C, Hawes D, Banu D, Feldman D*. 32 (1997) 405–410. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(97\)00009-7](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(97)00009-7).
- [29] L. Shilei, Z. Neng, F. Guohui, Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter, *Energy and Buildings*. 38 (2006) 18–24.
- [30] 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. <https://doi.org/10.18178/jocet.2017.5.1.345>.
- [31] L.F. 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. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.030>.
- [32] M. Bahrar, Z.I. Djamai, 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. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.014>.
- [33] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, L.F. Cabeza, Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling, *Energy and Buildings*. 42 (2010) 534–540. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.022>.

- [34] R. Saxena, D. Rakshit, S.C. Kaushik, Phase change material (PCM) incorporated bricks for energy conservation in composite climate: A sustainable building solution, *Solar Energy*. 183 (2019) 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.035>.
- [35] 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) 109579. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109579>.
- [36] 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. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.745>.
- [37] Norma Portuguesa Definitiva (NP), NP-581, Determinação das massas volúmicas e da absorção de água de brita e godos, 1969.
- [38] Norma Portuguesa Definitiva (NP), NP-954, Determinação das massas volúmicas e da absorção de água de areias, 1973.
- [39] J. Figueroa, M. Fuentealba, R. Ponce, M. Zúiga, Effects on the Compressive Strength and Thermal Conductivity of Mass Concrete by the Replacement of Fine Aggregate by Mussel Shell Particulate, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 503 (2020) 11. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/503/1/012070>.
- [40] European Committee for Standardization (CEN), EN 206-1, Concrete - Part 1: Specification, performance, production e conformity, Concrete, 2007.
- [41] European Committee for Standardization (CEN), EN-12390-3, Hardened concrete tests, Part 3: Compressive strength of test specimens, 2003.

## ORCID

Zhiyou Jia	0000-0002-5402-0600 ( <a href="https://orcid.org/0000-0002-5402-0600">https://orcid.org/0000-0002-5402-0600</a> )
Sandra Raquel Leite da Cunha	0000-0002-6384-1355 ( <a href="https://orcid.org/0000-0002-6384-1355">https://orcid.org/0000-0002-6384-1355</a> )
José Luís Barroso de Aguiar	0000-0003-3954-5721 ( <a href="https://orcid.org/0000-0003-3954-5721">https://orcid.org/0000-0003-3954-5721</a> )