



Argamassas de Cal com Agregados Reciclados de Argamassa: Influência do Processo de Desagregação

Lime Mortars with Recycled Mortar Aggregates: Influence of the Disintegration Process

SILVA, Bruna¹; BRAVO, Miguel²; PEREIRA, Manuel Francisco Costa³; FERREIRA PINTO, Ana Paula⁴

bruna.silva@tecnico.ulisboa.pt¹; miguelnbravo@tecnico.ulisboa.pt²; mfcp@tecnico.ulisboa.pt; anapinto@civil.ist.utl.pt.

¹ Doutora em Engenharia Civil, CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal.

^{2, 4} Prof.(a) Doutor(a) em Engenharia Civil, CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal.

³ Prof. Doutor em Engenharia de Minas, CERENA, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal.

Informações do Artigo

Palavras-chave:
Argamassa de cal
Agregados reciclados
Reutilização
Economia circular

Keywords:
Lime mortar
Recycled aggregates
Reuse
Circular economy

Resumo:

A crescente procura por materiais de construção tem levado à escassez progressiva de areia natural e ao aumento dos resíduos de construção e demolição (RCD), uma parte significativa dos quais continua a ser depositada em aterro. A utilização de agregados reciclados provenientes de RCD oferece uma solução sustentável para ambos os desafios, promovendo a eficiência dos recursos e uma economia circular no setor da construção. No entanto, embora os agregados reciclados derivados de RCD à base de cimento tenham sido amplamente estudados, os provenientes de materiais à base de cal permanecem, em grande medida, pouco explorados. Este estudo apresenta uma avaliação inicial das características dos agregados reciclados obtidos a partir de argamassas de cal aérea carbonatada, bem como do desempenho de novas argamassas de cal aérea formuladas com esses agregados. Foram utilizados dois métodos de desagregação (britadeira de maxilas e moinho de bolas), tendo sido avaliada a sua influência nas propriedades dos agregados. Posteriormente, foram analisadas as propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido (após carbonatação acelerada). Verificou-se que os agregados obtidos por britadeira de maxilas (ARB) apresentaram maior quantidade de pasta aderida, menor massa volúmica e maior absorção de água face aos obtidos por moinho de bolas (ARM). Por conseguinte, as argamassas com ARB necessitaram de mais água para o mesmo espalhamento, o que se traduziu numa maior porosidade, coeficiente de capilaridade e teor de água às 48 horas, mas também em resistências mecânicas superiores face à argamassa de referência. Ambos os agregados revelaram potencial para aplicação em argamassas de reabilitação, sendo, contudo, necessários estudos complementares.

Abstract

The growing demand for construction materials has led to the increasing scarcity of natural sand and a surge in construction and demolition waste (CDW), a significant portion of which continues to be landfilled. Utilizing recycled aggregates from CDW offers a sustainable solution to

both challenges, promoting resource efficiency and a circular economy in the construction sector. However, while recycled aggregates from cement-based CDW have been extensively studied, those derived from lime-based materials remain largely underexplored. This study presents an initial assessment of the characteristics of recycled aggregates obtained from carbonated air lime mortars, as well as the performance of new air lime mortars formulated with them. Two mechanical disaggregation methods (jaw crushing and ball milling) were used, and their influence on aggregate properties was evaluated. The fresh and hardened state (after accelerated carbonation) properties of the mortars were then assessed. Aggregates obtained with the jaw crusher (RAJC) exhibited a higher amount of adhered paste, lower density, and greater water absorption compared to those obtained with the ball mill (RABM). As a result, mortars incorporating RAJC required more water to achieve the same workability, leading to increased porosity, higher capillary absorption, and greater water content after 48 hours in immersion. Despite these characteristics, they showed higher mechanical strength than the reference air lime mortar produced with natural sand. Both recycled aggregates demonstrated potential for use in restoration mortars, although further research is required.

1. Introdução

Os agregados são um dos principais componentes do betão e das argamassas. No entanto, o aumento da produção e utilização destes materiais de construção, impulsionado pelo rápido crescimento urbano e populacional, tem contribuído para uma extração excessiva de areia, conduzindo à sua crescente escassez [1]. Simultaneamente, os resíduos de construção e demolição (RCD) representam cerca de 30% dos resíduos sólidos gerados a nível global, estimando-se que cerca de 35% ainda sejam depositados em aterro [2]. Esta realidade evidencia a necessidade premente de valorizar e reutilizar estes materiais, com vista à redução do seu impacto ambiental. Assim, a utilização de agregados reciclados produzidos a partir de RCD constitui uma estratégia promissora para enfrentar ambos os desafios, ao mesmo tempo que promove uma economia circular no setor da construção. Neste contexto, os resíduos de alvenaria à base de cal representam uma fonte valiosa, mas pouco aproveitada, de agregados reciclados.

A cal foi o ligante por excelência até ao início século XX. Devido à sua prevalência histórica, os edifícios de alvenaria com argamassas de cal como material de

assentamento ou reboco são comuns em todo o mundo. Em Portugal, sabe-se apenas que um número significativo dos mais de 1,5 milhões de edifícios de alvenaria existentes (num parque edificado total de 3 milhões) terá sido construído utilizando argamassas de cal [3]. Assim, este tipo de resíduos constitui uma parte relevante de todos os RCD gerados. Devido à sua reduzida resistência mecânica, é possível separar facilmente a argamassa das unidades resistentes que constituem a alvenaria [4] e, em seguida, os grãos de areia da matriz de cal, podendo obter-se agregados reciclados com pequenas quantidades de pasta.

Apesar do seu potencial, a reutilização dos resíduos de alvenaria de cal provenientes de intervenções de requalificação, conservação, restauro ou mesmo demolição (quando não possuem valor histórico ou patrimonial) ou colapso destes edifícios tem sido pouco explorada, ao contrário do que sucede com os resíduos de materiais cimentícios.

Entre os fatores que influenciam as propriedades dos agregados reciclados, destaca-se o método de desagregação aplicado aos resíduos. Este processo impacta diretamente a composição, a granulometria e,

por consequência, a absorção de água, a massa volúmica, entre outras características [5, 6], o que influencia o potencial de reutilização dos agregados na formulação de novas argamassas.

Tendo em conta o exposto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma primeira avaliação: (i) das características dos agregados reciclados provenientes de argamassas de cal aérea, obtidos por diferentes métodos de desagregação mecânica, e (ii) do desempenho físico e mecânico das argamassas formuladas com esses agregados. Para tal, foram selecionados dois métodos distintos de desagregação: britadeira de maxilas, que origina agregados reciclados com maior quantidade de pasta aderida, e moinho de bolas (operado sem esferas, promovendo essencialmente a desagregação por atrito) que origina agregados com uma quantidade de pasta aderida significativamente inferior. Com base nos resultados obtidos, pretende-se avaliar o potencial destes agregados reciclados para a produção de novas argamassas.

Com este estudo pretende-se contribuir para a sustentabilidade e para a transição para uma economia circular no setor da construção, através da valorização de resíduos de construção e demolição, e para a redução dos impactos ambientais associados à extração de areia natural e à deposição de resíduos em aterro.

2. Trabalho experimental

2.1 Materiais

Como material de base para a obtenção dos agregados reciclados, foi produzida uma argamassa de cal aérea com um traço volumétrico de 1:2 (ligante:areia), utilizando-se uma cal aérea do tipo CL 80-S (de acordo com a EN 459-1:2002 [7]) da Calcidrata (Portugal) como ligante e agregado fino silicioso, com granulometria 0/4 mm (de acordo com a EN 13139:2002 [8]), fornecido pela empresa Soarvamil (Portugal). A relação água/ligante (a/l) foi fixada em 1,0, de modo

a garantir uma consistência adequada para a moldagem dos provetes.

Foram moldados provetes prismáticos com as dimensões normalizadas de $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$, conforme especificado na EN 1015-2: 1998 [9], que permaneceram armazenados em câmara seca ($60 \pm 10 \text{ \% RH}$ e $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) durante os primeiros 7 dias. Decorrido esse período, os provetes foram desmoldados e transferidos para uma câmara de carbonatação ($5 \text{ \% CO}_2$, $60 \text{ \% RH}$ e $23 \text{ }^\circ\text{C}$) durante mais 7 dias, de forma a promover a sua completa carbonatação, seguindo um procedimento previamente estabelecido pelos autores [10].

Após o período de carbonatação acelerada, três destes provetes foram selecionados para caracterização mecânica, tendo a argamassa de base apresentado uma resistência à tração por flexão de $0,56 \pm 0,09 \text{ MPa}$ e uma resistência à compressão de $2,07 \pm 0,14 \text{ MPa}$, determinadas com base na EN 1015-11: 1999 [11]. Os restantes provetes foram desagregados por um de dois métodos distintos: (i) uma passagem única pela britadeira de maxilas, regulada para um espaçamento de 5 mm (agregado designado por ARB), ou (ii) moagem durante 5 minutos no moinho de bolas, sem adicionar as esferas (agregado designado por ARM). Os agregados reciclados obtidos foram sujeitos a ensaios de caracterização, nomeadamente à análise da sua granulometria e à determinação do respectivo módulo de finura (EN 933-1:2012 [12]).

O material desagregado foi depois peneirado, e as diferentes fracções granulométricas foram combinadas de modo a reproduzir a curva granulométrica do agregado natural, com o intuito de permitir uma comparação mais directa dos agregados e da sua influência nas propriedades das argamassas com eles produzidos. Os agregados reciclados foram depois sujeitos à determinação da baridade (EN 1097-3:1998 [13]), da massa volúmica e da absorção de água (EN 1097-6:2013 [14]). Para efeitos de comparação, os mesmos ensaios foram

também realizados ao agregado natural (designado por AN).

2.2 Formulações de argamassa

Inicialmente, foi produzida uma argamassa de referência (REF), utilizando areia siliciosa natural (idêntica à utilizada na argamassa de base) e cal aérea do tipo CL 90-S da Calcidrata (Portugal) como ligante, mantendo-se o traço volumétrico da argamassa de base (1:2). A relação a/l foi ajustada para 1,1, de forma a garantir uma consistência de 155 ± 5 mm, determinada de acordo com o ensaio da mesa de espalhamento (EN 1015-3:1999 [15]).

Subsequentemente, foram produzidas argamassas com agregados reciclados, mantendo-se o mesmo ligante, o mesmo traço volumétrico e ajustando-se a relação a/l de forma a garantir uma consistência idêntica à da argamassa de referência (155 ± 5 mm). Foram, assim, estudadas duas formulações de argamassa com agregados reciclados: a argamassa ARB-CF, utilizando material proveniente da britadeira de maxilas, e a argamassa ARM-CF, recorrendo ao material obtido através do moinho de bolas.

Com base na baridade dos diferentes constituintes, o traço volumétrico adoptado (1:2) foi convertido em traço ponderal, de forma a permitir um cálculo mais rigoroso das quantidades de materiais necessárias para cada amassadura.

As argamassas foram produzidas com base na EN 1015-2:1998 [9]. Primeiramente, procedeu-se à introdução do agregado e da água na misturadora, sendo adicionada a cal aérea apenas após 30 segundos de mistura. Para a caracterização física e mecânica das diferentes formulações, foram moldados provetes prismáticos com dimensões de $160 \times 40 \times 40$ mm³, também de acordo com a EN 1015-2: 1998 [9], os quais foram sujeitos às mesmas condições de cura que a argamassa de base: 7 dias em câmara seca (60 ± 10 % RH e 20 ± 5 °C), seguidos de 7 dias em câmara de carbonatação (5 % CO₂, 60 % RH e 23 °C).

2.3 Ensaio

No estado fresco, foi determinada a consistência por espalhamento das argamassas de acordo com a EN 1015-3:1999 [15], e a respectiva massa volúmica de acordo com a EN 1015-6:1998 [16].

No estado endurecido, avaliaram-se as resistências à tração por flexão e à compressão segundo a EN 1015-11:1999 [10], a porosidade aberta conforme a RILEM Test I.1 [17], o teor em água após 48 horas de imersão de acordo com a RILEM Test II.1 [19], e a absorção de água por capilaridade com base na EN 1015-18:2002 [20]. Neste último ensaio, o coeficiente de capilaridade foi calculado considerando o declive da parte linear da curva de absorção de água.

3. Resultados

3.1 Propriedades dos agregados reciclados

A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas da areia natural e dos agregados reciclados obtidos após os processos de desagregação e antes de serem peneirados de modo a reproduzir a curva granulométrica do agregado natural, enquanto a Figura 2 ilustra o aspecto visual das fracções granulométricas dos materiais reciclados após peneiração. Como pode ser observado, uma passagem das argamassas pela britadeira de maxilas (agregado ARB) resultou na obtenção de uma maior percentagem de partículas com dimensão acima de 0,5 mm, correspondentes a grãos de agregado com pasta aderida. Devido a esta diferença na curva granulométrica, obteve-se um agregado com um módulo de finura (MF) superior (Figura 1) ao do agregado natural. Refira-se que a abertura da britadeira foi ajustada para 5 mm, de forma a evitar a fragmentação das partículas de areia natural (AN), preservando assim a integridade dos grãos maiores.

Por sua vez, a desagregação pelo moinho de bolas (agregado ARM) originou um agregado reciclado com uma maior percentagem de partículas inferiores a 2 mm, correspondentes a fragmentos de pasta.

Acima desse valor, a distribuição granulométrica é semelhante à da areia natural, o que indica que as partículas de areia de maior dimensão obtidas por este processo apresentavam pouca pasta aderida. Esta diferença na distribuição granulométrica resultou num módulo de finura do agregado ARM inferior ao da areia natural (Figura 1).

Figura 1 – Curvas granulométricas da areia natural (AN) e dos agregados reciclados (ARB e ARM) e respectivo módulo de finura (MF)

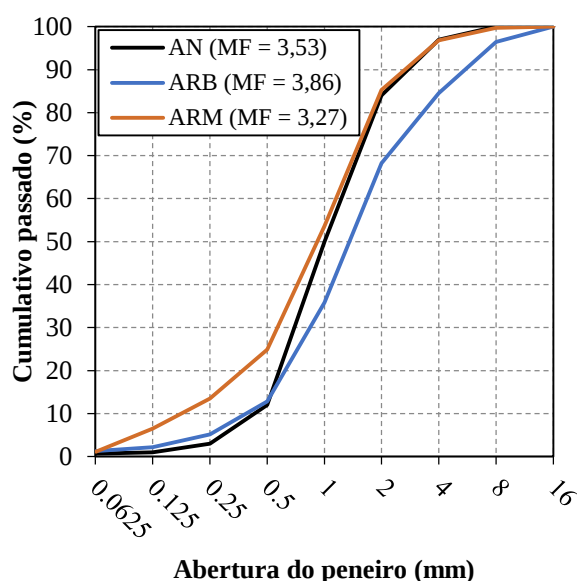
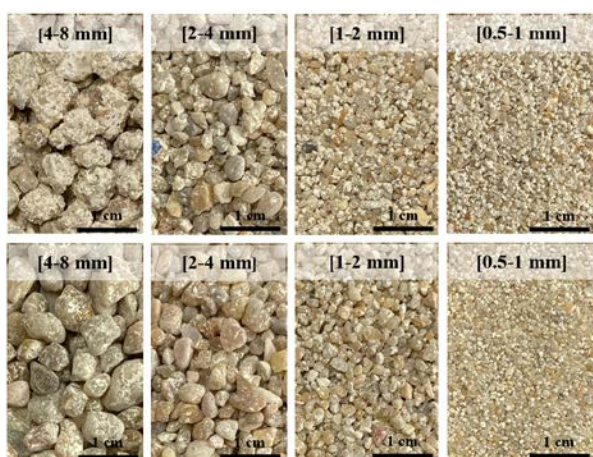


Figura 2 – Aspecto das fracções granulométricas dos agregados reciclados após peneiração, obtidos através de: britadeira de maxilas – ARB (em cima) e moinho de bolas – ARM (em baixo)



Fonte: elaborado pelos autores (2025)

Após peneiração, as diferentes fracções de cada agregado reciclado foram combinadas de modo a compor uma curva granulométrica semelhante à da areia natural. As partículas

de dimensões superiores a 4 mm e inferiores a 0,063mm foram excluídas de todos os agregados. Posteriormente, estes agregados foram submetidos a ensaios de caracterização, cujos resultados (valores médios) são apresentados na Tabela 1.

Como se pode observar na Figura 2, o agregado britado (ARB) apresentou uma maior quantidade de pasta aderida, evidenciada pela sua menor massa volúmica, maior absorção de água e menor baridade (Tabela 1). Com base no valor das massas volúmicas, estima-se que a quantidade de pasta aderida seja de cerca de 13% para o agregado ARB e de 8% para o ARM.

Tabela 1 – Propriedades da areia natural (AN) e dos agregados reciclados (ARB e ARM)

Agregado	ρ_{rd} (kg/m ³)	ρ_{ssd} (kg/m ³)	WA _{24h} (%)	ρ_b (kg/m ³)
AN	2610	2620	0,3	1537
ARB	2268	2411	6,3	1243
ARM	2402	2481	3,3	1427

ρ_{rd} – massa volúmica dos agregados secos em estufa;
 ρ_{ssd} – massa volúmica dos agregados saturados com superfície seca; WA_{24h} – absorção de água após 24h;
 ρ_b – baridade.

3.2 Propriedades no estado fresco das argamassas com agregados reciclados

A Tabela 2 apresenta os valores da relação a/l necessários para a obtenção de um espalhamento fixo de 155 ± 5 mm, bem como a massa volúmica das argamassas no estado fresco.

Tabela 2 – Formulações e propriedades das argamassas no estado fresco

Argamassa	Traço vol.	Traço pond.	Rel. a/l	Esp. (mm)	ρ_m (kg/m ³)
REF		1:4,7	1,10	153	1982
ARB-CF	1:2	1:3,8	1,30	155	1879
ARM-CF		1:4,4	1,18	153	1977

ρ_m – massa volúmica da argamassa no estado fresco.

Como seria expectável, as argamassas produzidas com agregado reciclado necessitaram de uma maior relação a/l para atingir o mesmo espalhamento, tendo este

valor sido mais elevado na argamassa ARB-CF (aumento de 18%). Este comportamento deve-se à maior quantidade de pasta residual aderida nos agregados obtidos pela britadeira de maxilas (estimada em 13%), em comparação com a presente nos agregados provenientes do moinho de bolas (estimada em 8%). Como consequência, verificou-se uma diminuição proporcional da massa volúmica das argamassas frescas, explicada não só pela menor massa volúmica dos agregados reciclados, devido à presença da pasta aderida, mas também pela maior quantidade de água (constituente com a menor massa volúmica) necessária para atingir a consistência pretendida.

3.3 Propriedades no estado endurecido das argamassas com agregados reciclados

A Tabela 3 apresenta os resultados (valor médio $\pm$ desvio-padrão) obtidos para a resistência à tracção por flexão e para a resistência à compressão das argamassas, após terem sido sujeitas a carbonatação acelerada. Como se pode observar, verificou-se um aumento significativo nas resistências à tração (43%) e à compressão (26%) das argamassas contendo agregados reciclados provenientes da britadeira de maxilas (ARB-CF), face à argamassa de referência (REF). Por outro lado, as argamassas com agregados reciclados obtidos por moagem em moinho de bolas (ARM-CF) apresentaram uma resistência à tração ligeiramente inferior (diferença de 12%) e um pequeno aumento da resistência à compressão (diferença de 8%), face à argamassa de referência.

A maior resistência mecânica observada na argamassa M-RAJC poderá estar relacionada com uma melhor ligação entre a pasta e a pasta aderida presente nos agregados reciclados. Tal desempenho provavelmente resulta da superfície mais rugosa, irregular e porosa dos agregados reciclados em comparação com os agregados naturais, o que proporciona uma superfície específica maior [21] e favorece a interpenetração da pasta na sua superfície, promovendo assim a formação de uma zona de transição interfacial (ITZ) mais coesa e com menor porosidade. Nesta

formulação, essa melhoria na ITZ pode ter compensado o aumento da porosidade aberta (Tabela 3) causado pela maior relação a/l utilizada. Este resultado vai ao encontro do obtido por Stefanidou et al. [22], embora, nesse estudo, tenham sido utilizados agregados reciclados provenientes de RCDs mistos (betão, cerâmicos, gesso, vidro e asfalto), e o aumento de resistência mecânica tenha sido atribuído à reação entre a cal e os constituintes siliciosos presentes nos agregados reciclados. Neste sentido, o acréscimo moderado de resistência observado revela-se particularmente promissor para a utilização de agregados reciclados em argamassas de cal, dado que a melhoria das propriedades mecânicas constitui uma mais-valia relevante.

Já no caso da argamassa ARM-CF, a resistência mecânica obtida foi muito semelhante à da argamassa de referência, o que poderá ser justificado pelo menor teor de pasta aderida, cujo efeito benéfico na melhoria da ITZ não terá sido suficiente para compensar o impacto negativo de uma relação a/l mais elevada relativamente à REF.

Tabela 3 – Resistência mecânica das argamassas no estado endurecido, após carbonatação acelerada

Argamassa	f_f (MPa)	f_c (MPa)
REF	$0,47 \pm 0,05$	$2,47 \pm 0,08$
ARB-CF	$0,67 \pm 0,04$	$3,10 \pm 0,13$
ARM-CF	$0,42 \pm 0,02$	$2,68 \pm 0,02$

f_f – resistência à tracção por flexão; f_c – resistência à compressão.

Na Tabela 4 encontram-se os resultados (valor médio $\pm$ desvio-padrão) obtidos para as propriedades físicas das argamassas, após terem sido sujeitas a carbonatação acelerada. Relativamente à porosidade aberta, verificou-se que as argamassas com incorporação de agregados reciclados apresentaram valores superiores de porosidade comparativamente à argamassa de referência. Em particular, a argamassa com agregados reciclados provenientes da britadeira de maxilas (ARB-CF) registou um aumento de 30%, enquanto a argamassa com agregados reciclados obtidos

através do moinho de bolas (ARM-CF) apresentou um aumento de 6%. Este incremento da porosidade poderá ser atribuído, por um lado, à maior relação a/l utilizada nas formulações com agregados reciclados e, por outro, à presença de pasta aderida nos próprios agregados, sendo a influência de ambos os factores mais acentuada no caso da argamassa ARB-CF. Resultados idênticos foram obtidos por Stefanidou et al. [22], que também associaram a utilização de agregados reciclados a um aumento da porosidade em argamassas de cal.

A maior porosidade aberta das argamassas com agregados reciclados refletiu-se num coeficiente de absorção de água por capilaridade superior, bem como num maior teor em água após 48 horas de imersão, conforme apresentado na Tabela 4. Em ambos os casos, o agregado obtido através da britadeira de maxilas (ARB) foi o que originou os maiores acréscimos, com aumentos de 35% no teor em água e de 8% no coeficiente de capilaridade, face à argamassa de referência. Por sua vez, o agregado obtido através do moído de bolas (ARM) deu origem a aumentos de 16% no teor em água e de 5% no coeficiente de capilaridade, relativamente à mesma referência. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por outros autores que estudaram a incorporação de agregados reciclados de diferentes origens em argamassas de cimento [23, 24, 25].

Tabela 4 – Propriedades físicas das argamassas no estado endurecido, após carbonatação acelerada

Argamassa	P_{ab} (%)	C ($\text{kg.m}^{-2}.\text{min}^{-0.5}$)	W_{48h} (%)
REF	$29,1 \pm 1,3$	$1,92 \pm 0,27$	$11,5 \pm 0,04$
ARB-CF	$37,7 \pm 2,7$	$2,09 \pm 0,06$	$17,8 \pm 0,07$
ARM-CF	$30,9 \pm 0,1$	$2,03 \pm 0,24$	$13,7 \pm 0,04$

P_{ab} – porosidade aberta; C – coeficiente de absorção de água por capilaridade; W_{48h} – teor em água após 48h de imersão.

4. Conclusões

Neste trabalho foram estudadas argamassas de cal aérea produzidas com agregados resultantes da reciclagem de argamassas de cal aérea artificialmente carbonatadas. Estas últimas foram desagregadas por dois métodos distintos: britadeira de maxilas (ARB) ou moinho de bolas (ARM). Os agregados obtidos pelo primeiro processo apresentaram uma quantidade de pasta aderida superior, o que se refletiu numa menor massa volúmica, maior absorção de água e menor baridade, quando comparados com os agregados obtidos através do segundo processo.

No que diz respeito às propriedades das argamassas, as formulações com ARB requereram uma maior relação a/l para atingir o mesmo espalhamento da argamassa de referência. Esta maior necessidade de água traduziu-se numa porosidade aberta superior, o que, por sua vez, conduziu a um coeficiente de capilaridade e a um teor em água às 48 horas mais elevado. Por contraste, as argamassas com ARM apresentaram propriedades físicas mais próximas da argamassa de referência. No entanto, as argamassas com ARB registaram uma resistência mecânica mais elevada (acrécimo de 43% à flexão e 26% à compressão) do que a da argamassa de referência, resultado que poderá estar associado a uma melhor ligação entre a pasta e os agregados reciclados do que entre a pasta e os agregados naturais. Este efeito será objeto de investigação complementar num estudo futuro.

Apesar das diferenças de desempenho observadas entre os dois tipos de agregados reciclados, verificou-se que ambos apresentam potencial para serem utilizados na produção de argamassas de cal aérea, sobretudo considerando que o desempenho das formulações pode ser otimizado com a incorporação de adjuvantes redutores de água. No entanto, estes resultados deverão ser consolidados com a realização de um estudo mais abrangente.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro atribuído pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), através do: (i) projeto UIDB/04625/2025 da unidade de investigação CERIS; (ii) projecto 2023.11492.PEX; e (iii) contrato 2023.06796.CEECIND da primeira autora.

6. Referências

- [1] TORRES, A.; BRANDT, J.; LEAR, K.; LIU, J. A looming tragedy of the sand commons. *Science*, v. 357, n. 6355, p. 970-971, 2017.
- [2] KABIRIFAR, K.; MOJTAHEDI, M.; WANG, C.; TAM, V. W. Y. Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: a review. *Journal of Cleaner Production*, v. 263, p. 121265, 2020.
- [3] INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA (INE). Censos da população e habitação: Censos 2001, Portugal. Lisboa: INE, 2003.
- [4] HALLIDAY, S. *Sustainable Construction*. 1. ed. London: Routledge, 2018.
- [5] HUBERT, J. et al. Effect of crushing method on the properties of produced recycled concrete aggregates. *Buildings*, v. 13, n. 9, p. 2217, 2023.
- [6] SBARDELOTTO, E. K. et al. Influence of recycling processes on properties of fine recycled concrete aggregates (FRCA): an overview. *Waste*, v. 2, p. 136–152, 2024.
- [7] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 459-1:2015 – Building lime – Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria. Brussels, 2015.
- [8] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 13139:2002 – Aggregates for mortar. Brussels, 2002.
- [9] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 1015-2:1999 – Methods of test for mortar for masonry – Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars. Brussels, 1999.
- [10] SILVA, B. A. et al. Effects of natural and accelerated carbonation on the properties of lime-based materials. *Journal of CO₂ Utilization*, v. 49, p. 101552, 2021.
- [11] 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. Brussels, 1999.
- [12] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 933-1:2012 – Tests for geometrical properties of aggregates – Part 1: Determination of particle size distribution – Sieving method. Brussels, 2012.
- [13] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 1097-3:1998 – Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 3: Determination of loose bulk density and voids. Brussels, 1998.
- [14] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 1097-6:2013 – Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 6: Determination of particle density and water absorption. Brussels, 2013.
- [15] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 1015-3:1999 – Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Brussels, 1999.
- [16] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 1015-6:1998 – Methods of test for mortar for masonry – Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar. Brussels, 1998.

- [17] ASTM INTERNATIONAL. ASTM E1876-01 – Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. West Conshohocken: ASTM International, 2006.
- [18] RILEM TC 25 PEM. Test I.1 – Porosity accessible to water. Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. *Materials and Structures*, v. 13, p. 177-179, 1980.
- [19] RILEM TC 25 PEM. Test II.1 – Saturation coefficient. Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. *Materials and Structures*, v. 13, p. 177-179, 1980.
- [20] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 1015-18:2002 – Methods of test for mortar for masonry – Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. Brussels, 2002.
- [21] SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials*, v. 105, p. 400-415, 2016.
- [22] STEFANIDOU, M.; ANASTASIOU, E.; GEORGIADIS FILIKAS, K. Recycled sand in lime-based mortars. *Waste Management*, v. 34, n. 12, p. 2595-2602, 2014.
- [23] MARTÍNEZ, I. et al. A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars. *Construction and Building Materials*, v. 49, p. 384-392, 2013.
- [24] MORA-ORTIZ, R. S. et al. Mechanical behavior of masonry mortars made with recycled mortar aggregate. *Materials*, v. 13, n. 10, p. 2373, 2020.
- [25] INFANTE GOMES, R.; PEDERNEIRAS, C.; FARINHA, C.; VEIGA, M. R.; BRITO, J.; FARIA, P. Argamassas com agregados reciclados de RCD submetidos a carbonatação forçada: avaliação do seu comportamento em aplicações em suporte de tijolo. IV Simpósio Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento, ITECONS, Coimbra, 2022.