

Argamassas com agregados reciclados de RCD submetidos a carbonatação forçada: Avaliação do seu comportamento em aplicações em suporte de tijolo

RICARDO INFANTE GOMES¹
CINTHIA MAIA PEDERNEIRAS¹
CATARINA BRAZÃO FARINHA¹
ROSÁRIO VEIGA²
JORGE DE BRITO³
PAULINA FARIA⁴

¹ c5lab - Sustainable Construction Materials Association | Lisboa | Portugal

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil | Lisboa | Portugal

³ CERIS - Instituto Superior Técnico | Lisboa | Portugal

⁴ Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa | Caparica | Portugal

Autor correspondente: rgomes@c5lab.pt

Palavras-chave

Argamassas de revestimento, Agregados reciclados, Carbonatação forçada, Captura e armazenamento de carbono

Resumo

A indústria da construção é responsável por um terço do total de resíduos produzidos na EU. Atualmente, encontrar soluções para a reutilização ou reciclagem destes resíduos é uma das maiores preocupações ambientais do sector. A substituição de areia natural em materiais de construção, tais como betões ou argamassas, por resíduos de construção e demolição (RCD) é uma alternativa favorável, já que aumenta o ciclo de vida dos resíduos e reduz o uso de recursos naturais. Estes agregados, que em geral contêm proporções elevadas de materiais cimentícios, têm algum potencial de carbonatação e, portanto, capacidade para a captura de CO₂. Ao serem incorporados, reduzem as emissões deste gás para a atmosfera, contribuindo assim também para a neutralidade carbónica da indústria cimenteira e da construção em geral. Os RCD, em contacto com o CO₂, reagem quimicamente através da carbonatação, o que expetavelmente contribui para o aumento da sua massa volúmica e redução da porosidade. Assim, estes novos agregados (RCD carbonatados) serão mais resistentes e menos absorventes, o que pode favorecer as propriedades das argamassas, em comparação com os mesmos agregados reciclados não carbonatados.

No estudo apresentado, os RCD foram submetidos a carbonatação forçada e acelerada durante diferentes períodos de tempo antes de serem incorporados em argamassas, em substituição parcial de areia natural. As argamassas foram produzidas com um traço volumétrico de 1:4 (cimento: agregado) com agregados naturais (argamassa de referência), agregados reciclados de RCD não carbonatados e agregados reciclados de RCD expostos a altos níveis de CO₂ (25% CO₂, 60% RH e 23 °C) por 5 horas e por 5 dias. Os agregados reciclados foram incorporados substituindo 50% e 100% (em volume) do agregado natural. A

avaliação destas argamassas foi feita em aplicações simulando reboco em suporte de tijolo, estudando-se o seu desempenho em termos de: características mecânicas, por ultrassons, aderência ao suporte e suscetibilidade à fendilhação; de comportamento à água, através de ensaios de permeabilidade à água sob baixa pressão (tubos de Karsten) e porosidade aberta.

Verificou-se que os RCD sujeitos a períodos curtos (5 horas) de exposição ao CO₂ melhoraram as suas características, ao contrário dos agregados que foram expostos durante períodos longos (5 dias). As argamassas com RCD não carbonatados apresentaram reduções nas propriedades mecânicas e hídras em comparação com as argamassas de referência. A redução do desempenho foi menos acentuada com a incorporação de agregados carbonatados durante períodos curtos, mas foi agravada quando foram usados RCD sujeitos a longos períodos de carbonatação, o que é consistente com as propriedades apresentadas pelos RCD carbonatados.

Assim, a carbonatação forçada, além de reduzir as emissões de CO₂, pode também melhorar as características dos agregados reciclados e das argamassas com eles produzidas, o que aumenta os níveis de confiança no seu uso. No entanto, é necessário otimizar o período e as condições de carbonatação.

1| INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios atualmente enfrentados pela sociedade é a luta contra as alterações climáticas, nomeadamente através da mitigação das emissões de dióxido de carbono (CO₂). O setor da construção é responsável por uma parte significativa das emissões de CO₂ a nível global, e ainda por gerar grandes quantidades de resíduos. Desta forma, tem surgido um interesse crescente neste setor com vista à redução do seu impacto ambiental, quer em termos de emissões de CO₂, quer na quantidade de resíduos gerada, ou no seu tratamento.

Estes resíduos, conhecidos por resíduos de construção e demolição (RCD), são resultantes de ações de construção, reabilitação, expansão, alteração, conservação e demolição de edifícios, representando, em volume, cerca de um terço de todos os resíduos produzidos na União Europeia [1]. Uma vez que os RCD se encontram disponíveis em grandes quantidades com baixos custos de aquisição, a sua incorporação em argamassas e betões na forma de agregados reciclados (AR) tem um impacto positivo na gestão do seu fim de vida, bem como na redução da exploração de agregados naturais. Não obstante, a sua utilização como AR é ainda limitada, nomeadamente devido ao facto de estes materiais reduzirem o desempenho dos materiais nos quais são incorporados. Assim, estas soluções devem ser melhoradas, e outras devem ser encontradas tendo em conta estes resíduos.

O cimento é obtido através de clínquer, que por sua vez resulta da calcinação a altas temperaturas de marga calcária (à base de carbonato de cálcio e argila), produzindo quantidades consideráveis de CO₂ - 650 a 800 kg por cada tonelada de cimento produzida -, que são emitidas para a atmosfera [2]. No entanto, qualquer material à base de cimento sofre carbonatação, reação química na qual a cal livre reage com o CO₂ formando carbonato de cálcio. Desta forma, é possível afirmar que parte do CO₂ emitido durante o processo de fabrico do cimento é reabsorvido por estes materiais [3].

A carbonatação forçada e acelerada como pré-tratamento provoca efeitos positivos nas características dos agregados de RCD, comparando com os utilizados tal qual (não-carbonatados), melhorando desta forma as suas propriedades e, conseqüentemente, as dos materiais nos quais são incorporados [4-8], como sejam as argamassas e os betões. Simultaneamente, há um contributo para a captura e armazenamento de CO₂ (CCS - *carbon capture and storage*).

Este artigo apresenta os resultados da avaliação do desempenho de argamassas de revestimento, aplicadas em suporte cerâmico simulando um reboco, formuladas com agregados reciclados provenientes de RCD sujeitos a carbonatação forçada e acelerada por dois períodos distintos: 5 horas e 5 dias. Este estudo integra o projeto WP10B - *Forced and accelerated sequestration of CO₂ by CDW to incorporate as aggregates in mortars and concrete* - do laboratório colaborativo c5Lab

(Sustainable Construction Materials Association), que pretende otimizar a captura de CO₂ através de RCD para posterior incorporação como agregados em argamassas e betões, compensando parte do CO₂ emitido pela indústria cimenteira.

2 | MATERIAIS E METÓDOS

2.1. Materiais

Um RCD, comercializado por uma estação de tratamento e reciclagem portuguesa, foi incorporado em argamassas de revestimento cimentícias, substituindo o agregado natural (AN), em volume, em 50% e 100%. Este resíduo, previamente analisado e caracterizado por Infante Gomes et al. [9], corresponde a uma mistura de partículas de diversos materiais com dimensões inferiores a 2 mm, sendo constituído, em massa, por 42% de betão, produtos de betão, argamassas ou blocos de betão de alvenarias.

O agregado reciclado foi incorporado tal qual como foi fornecido, e após ter sido sujeito a carbonatação forçada e acelerada numa câmara de carbonatação em condições de 23 °C de temperatura, 60% de humidade relativa e com uma concentração de CO₂ de 25%, durante um curto período de tempo (5 horas) e um período consideravelmente longo (5 dias). O ligante utilizado para a formulação das argamassas foi um cimento Portland tipo CEM II/B-L 32,5 N, da empresa cimenteira portuguesa CIMPOR. O AN utilizado resultou da combinação de diversas areias siliciosas calibradas, compostas por mais de 98% de sílica, com quartzito, quartzo e minerais de feldspato, da Areipor - Areias Portuguesas. O traço volumétrico utilizado foi de 1:4 (ligante: agregado), bastante comum na formulação de argamassas de revestimento.

O AR possui uma curva de distribuição granulométrica (Figura 1) considerada adequada para a formulação de argamassas, permitindo a sua viabilidade técnica na utilização direta por parte da indústria, sendo esta uma vantagem que deve ser tida em conta. Assim, a curva de distribuição granulométrica do agregado natural foi ajustada à do agregado reciclado, de forma a obter argamassas com agregados com a mesma distribuição, facilitando a sua comparação.

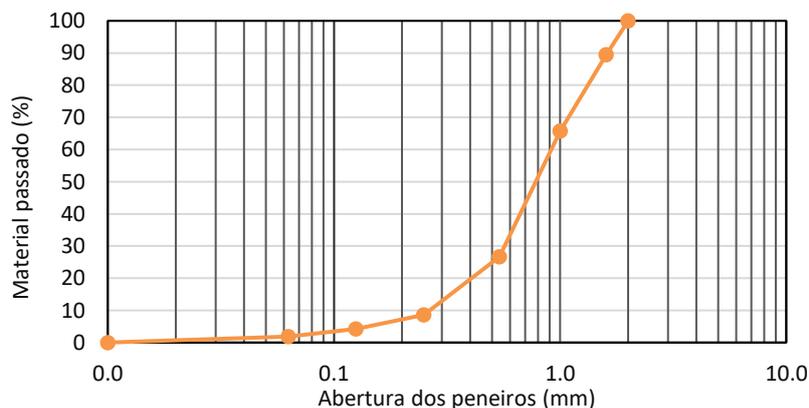


Figura 1. Curva de distribuição granulométrica do AR

Para a avaliação do desempenho destas argamassas, foram produzidos sete tipos de formulação distintos. Destes, a argamassa de referência (REF-AN) é a única que não contém agregado reciclado, sendo composta por 100% de agregado natural. Foram estudadas duas argamassas com o resíduo não carbonatado com proporções de substituição pelo agregado natural de 50% (AR-50%) e 100% (AR-100%). Foram também estudadas argamassas com as mesmas proporções de substituição, com o agregado reciclado sujeito a carbonatação forçada e acelerada durante 5 horas (ARC-5h-50% e ARC-5h-100%) e 5 dias (ARC-5d-50% e AC-5d-100%) - Tabela 1.

Tabela 1. Composição das argamassas (em traço volumétrico)

| Argamassa | Cimento | AN | AR | AR-C-5h | AR-C-5d |
|-------------|---------|----|----|---------|---------|
| REF-AN | 1 | 4 | - | - | - |
| AR-50% | 1 | 2 | 2 | - | - |
| ARC-5h-50% | 1 | 2 | - | 2 | - |
| ARC-5d-50% | 1 | 2 | - | - | 2 |
| AR-100% | 1 | - | 4 | - | - |
| ARC-5h-100% | 1 | - | - | 4 | - |
| ARC-5d-100% | 1 | - | - | - | 4 |

Para realizar a amassadura das argamassas, cada constituinte foi pesado numa balança com 0,1 g de precisão. As argamassas foram então aplicadas sobre tijolo cerâmico, processo constituído por diversas etapas. Primeiramente, foram colocadas duas réguas de madeira na parte superior do suporte, com altura de 2 cm, funcionando como cofragem. Seguidamente, o suporte foi polvilhado com água, de forma a evitar a rápida absorção da água de amassadura das argamassas e simulando aplicação perto da real. Finalmente, a argamassa foi aplicada com talocha com alguma pressão, garantindo um certo grau de compactação, e a sua superfície foi regularizada - Figura 2.



Figura 2. Aplicação de argamassa simulando reboco em tijolo cerâmico

2.2. Métodos

Para avaliar o desempenho das argamassas aplicadas em suporte cerâmico, foram realizados os ensaios presentes na Tabela 2, de acordo com as respetivas normas ou especificações de ensaio. O ensaio que determina o módulo de elasticidade por propagação de velocidade de ultrassons avalia a compacidade e rigidez das argamassas. Este ensaio tem por base um impulso de vibrações longitudinais que é produzido por um transdutor eletroacústico que é mantido sobre a superfície da argamassa. Este impulso atravessa um comprimento de percurso até a um segundo transdutor, sendo convertido num sinal elétrico. Desta forma, mede-se o tempo necessário para que o impulso de vibração percorra o caminho entre os dois transdutores. A medição da velocidade do impulso é realizada colocando os dois transdutores na mesma face da superfície da argamassa (método indireto). Desta forma, o módulo de elasticidade das argamassas (GPa) pode ser calculado através da equação 1, na qual K é calculado pela equação 2, v é o coeficiente de Poisson, V é a velocidade de propagação de ultrassons e ρ é a massa volúmica aparente da argamassa.

$$Me = K \times V^2 \times \rho \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$K = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}, \nu = 0.2 \quad (2)$$

Tabela 2. Ensaios de avaliação das argamassas aplicadas em suporte de tijolo cerâmico

| Ensaio | Norma |
|---|--------------------|
| Módulo de elasticidade por velocidade de propagação de ultrassons | EN 12504-4 [10] |
| Dureza superficial por durómetro | ASTM D2240-00 [11] |
| Aderência ao suporte | EN 1015-12 [12] |
| Porosidade aberta | EN 1936 [13] |
| Absorção de água sob baixa pressão | Fe Pa 39 [14] |
| Suscetibilidade à fissuração | - |

No ensaio de dureza superficial por durómetro, foram realizadas 12 medições, aleatoriamente distribuídas sobre as argamassas aplicadas no suporte de tijolo cerâmico, como ilustrado na Figura 3 a). O equipamento utilizado no ensaio possui na sua extremidade um pino que, quando pressionado contra o material pela ação da mola, sob carga normalizada, indica a resistência à penetração, que se traduz no movimento de um ponteiro ao longo de uma escala de 0 a 100. O ensaio de aderência ao suporte consiste em aplicar uma força perpendicular através de placas de tração coladas na superfície da argamassa - Figura 3 b).

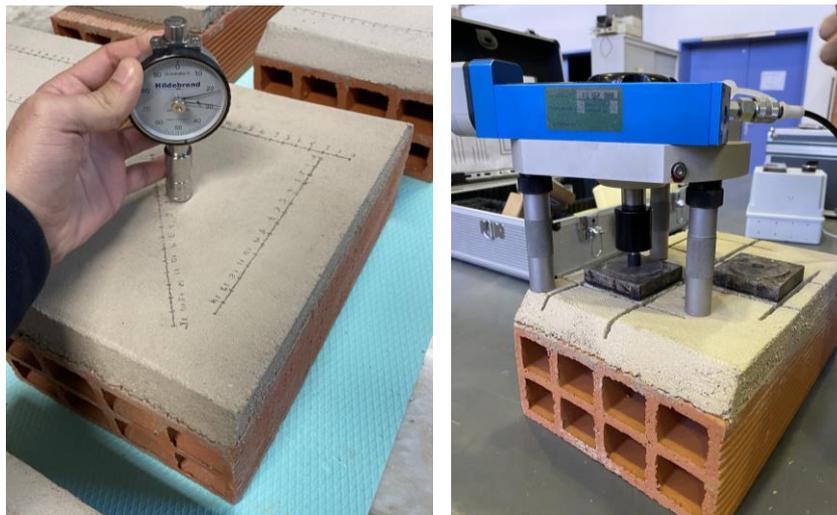


Figura 3. Ensaios de dureza superficial por durómetro (a) e de aderência ao suporte (b)

A força é aplicada com um dinamómetro modelo CONTROLS C 215/D, com uma escala de 0 a 5 kN, com precisão de 50 N, a uma taxa entre 0,003 e 0,100 N/(mm².s). As amostras são então arrancadas, o valor da carga de rotura é registado e a tensão de aderência é dada pela relação entre a força e a área das cabeças de tração. Podem ser obtidos três tipos de rotura no ensaio, sendo estes: adesivo, coesivo através da argamassa, e coesivo através do suporte. O ensaio de porosidade aberta foi realizado com amostras resultantes do ensaio de aderência ao suporte, aos 28 dias após aplicação da argamassa, quantificando o volume de poros interligados da argamassa. As amostras, três por argamassa, são secas a 40 ± 5 °C em estufa ventilada e inseridas num exsiccador fechado a vácuo a uma pressão de 400 mbar. Após 24 horas, é inserida água no exsiccador mantendo a pressão no seu interior, a uma velocidade lenta, de modo a submergir todas as amostras e mantendo uma altura de 1 cm acima delas. As amostras são mantidas submersas e sob pressão durante mais 24 horas. Passado este período, a bomba de vácuo é desligada e as amostras mantidas no exsiccador por 1 hora. Posteriormente, são medidas a massa hidrostática e a massa saturada com superfície seca. Assim, a porosidade aberta é obtida pelo quociente entre a diferença da massa saturada e massa seca pela diferença da massa saturada e massa hidrostática.

A permeabilidade à água sob baixa pressão é obtida através da colocação de um tubo de Karsten em contacto com a argamassa, selado com silicone, com água até à marca zero - Figura 4. A absorção de água é então registada aos instantes de 5 minutos, 10 minutos, 15 minutos, 30 minutos e uma hora. A partir deste ensaio é analisada a quantidade de água absorvida e calculado o coeficiente de absorção, determinado pela equação 3, na qual w_{m60} é a quantidade média de água absorvida aos 60 minutos e \varnothing_m o diâmetro do tubo no qual a água está em contacto com a argamassa. Por fim, o ensaio de suscetibilidade à fissuração baseia-se na observação visual das argamassas aplicadas em suporte de tijolo cerâmico ao longo do tempo, desde a sua aplicação até idades superiores, para a verificação do aparecimento, ou não, de fissuras na sua superfície.



Figura 4. Ensaio de absorção de água sob baixa pressão com tubos de Karsten

$$Ca = \frac{w_{m60} \times 10^{-3}}{\varnothing_m^2 \times \frac{\pi}{4} \times 10^{-6} \times \sqrt{60}} \quad (3)$$

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Módulo de elasticidade por velocidade de propagação de ultrassons

O módulo de elasticidade por velocidade de propagação de ultrassons das argamassas aplicadas em tijolo encontra-se apresentado na Tabela 3. Como esperado, é superior para a argamassa de referência (REF-AN), comparando com as argamassas com AR não carbonatados, e diminui com o aumento da quantidade de AR incorporada. Argamassas com 50% e 100% de substituição do AN pelo AR não carbonatado possuem um módulo de elasticidade de cerca de 3.5 e 3.4 GPa, correspondendo a uma diminuição de 7% e 10%, respetivamente, em comparação com a REF-AN.

Tabela 3. Módulo de elasticidade por velocidade de propagação de ultrassons das argamassas

| Agregado | Módulo de elasticidade (GPa) | | |
|---------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Não carbonatado | Carbonatado 5 h (ARC-5h) | Carbonatado 5 d (ARC-5d) |
| Areia natural | 3.72 ± 0.12 | - | - |
| 50% AR | 3.48 ± 0.27 | 4.03 ± 0.32 | 3.34 ± 0.56 |
| 100% AR | 3.35 ± 0.45 | 3.90 ± 0.31 | 3.28 ± 0.52 |

Após a carbonatação durante 5 horas, verifica-se um aumento do módulo de elasticidade das argamassas, tanto para taxas de substituição de 50% como de 100%, provando a eficácia da carbonatação dos agregados nas características mecânicas das argamassas. Contudo, quando formuladas com agregados submetidos a carbonatação por 5 dias, verifica-se uma diminuição do módulo de elasticidade das argamassas (4% e 2% para 50% e 100% de substituição, respetivamente), comparativamente às que possuem agregados não carbonatados.

3.2. Dureza superficial por durómetro

As argamassas formuladas com 50% e 100% de AR possuem uma dureza superficial inferior à argamassa formulada apenas com AN, como se vê na Figura 5. A introdução de agregados carbonatados, quer por 5 horas, quer por 5 dias, aumenta a dureza superficial das argamassas comparativamente às argamassas AR-50% e AR-100%. O aumento da dureza superficial é superior para as argamassas com agregados ARC-5h, que possuem valores bastante semelhantes à argamassa de referência.

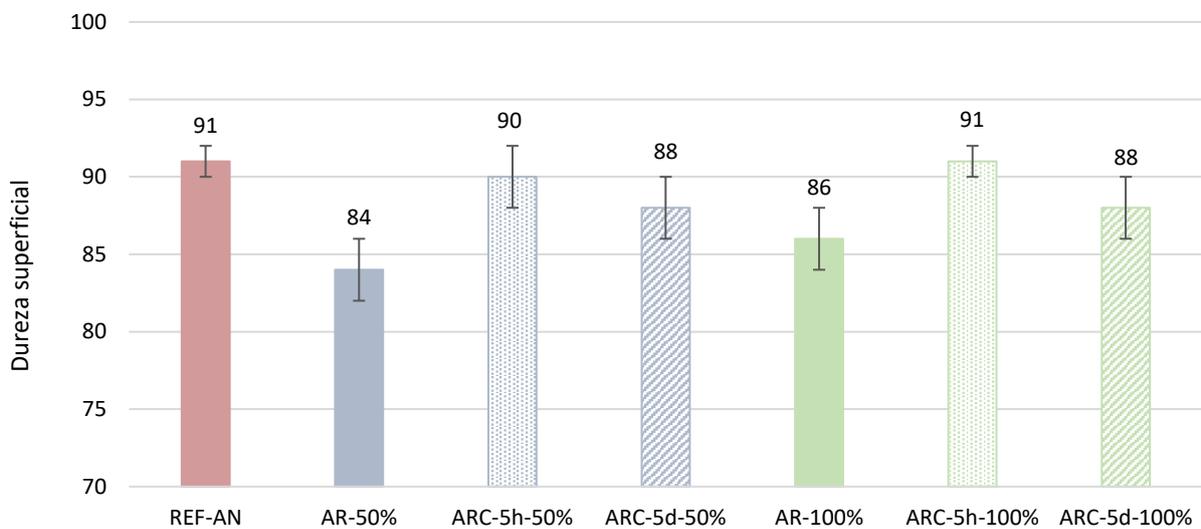


Figura 5. Dureza superficial por durómetro das argamassas aplicadas em tijolo cerâmico

3.3. Aderência ao suporte

Os valores da aderência ao suporte das argamassas aplicadas em tijolo cerâmico são apresentados na Tabela 4. Pode-se observar que a argamassa com 100% de agregado natural (REF-AN) é a que apresenta maior aderência ao suporte. Por sua vez, esta diminui com a introdução de agregado reciclado não carbonatado, sendo superior para a argamassa com 100% de AR não carbonatado (0.36 ± 0.00 MPa). A incorporação de agregados carbonatados diminui drasticamente a aderência ao suporte das argamassas, tanto sujeitos a carbonatação por 5 horas como por 5 dias, com exceção para a argamassa com incorporação de 50% de ARC-5d. Todas as argamassas apresentaram um padrão de rotura adesivo, como se constata pela Figura 6.

Tabela 4. Aderência ao suporte das argamassas aplicadas em tijolo cerâmico

| Agregado | Aderência ao suporte (MPa) | | |
|---------------|----------------------------|-----------------|-----------------|
| | Não carbonatado | ARC-5h | ARC-5d |
| Areia natural | 0.53 ± 0.11 | - | - |
| 50% AR | 0.26 ± 0.07 | 0.05 ± 0.00 | 0.20 ± 0.05 |
| 100% AR | 0.36 ± 0.00 | 0.13 ± 0.02 | 0.03 ± 0.00 |

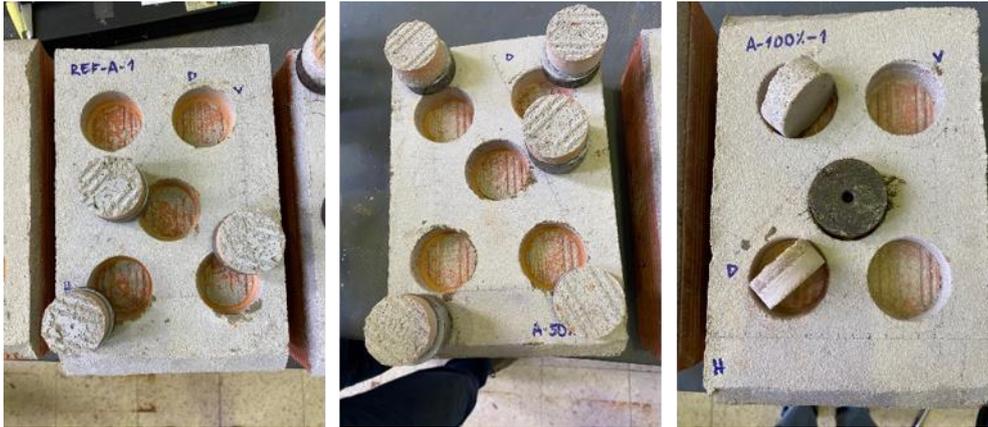


Figura 6. Padrão de rotura adesiva das argamassas aplicadas em tijolo cerâmico

3.4. Porosidade aberta

As argamassas produzidas com AR não carbonatado possuem uma porosidade aberta consideravelmente superior à REF-AN, tanto maior quanto maior for o volume de resíduo incorporado (18% e 38% para taxas de substituição de 50% e 100%, respetivamente) - Figura 7. A carbonatação do agregado reciclado por 5 horas produz diminuições da porosidade aberta das argamassas de cerca de 10% e 12% para 50% e 100% de substituição, respetivamente, comparativamente às que possuem o agregado reciclado não carbonatado, o que é consistente com o aumento de massa volúmica dos agregados reciclados com a carbonatação [4], [9], [15]. Contudo, um período mais longo de carbonatação dos agregados não produz a mesma tendência, ou seja, a porosidade aberta das argamassas com agregados ARC-5d é superior à das formuladas com agregados não carbonatados.

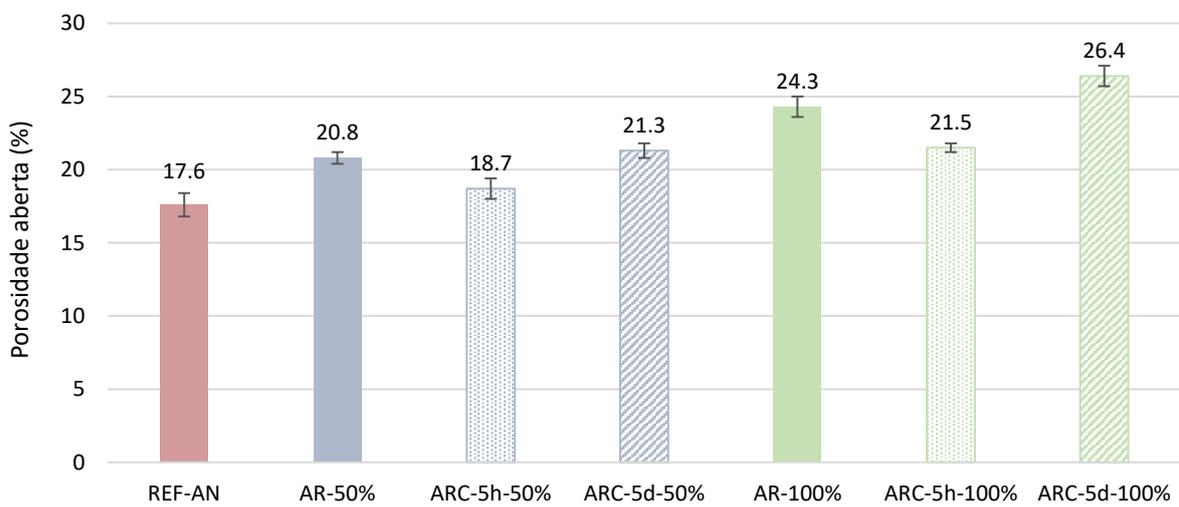


Figura 7. Porosidade aberta das argamassas aplicadas em tijolo cerâmico aos 28 dias

3.5. Absorção de água sob baixa pressão

A quantidade de água absorvida pelas argamassas no ensaio de absorção de água sob baixa pressão é apresentada na Tabela 5. Através da quantidade de água absorvida aos 60 minutos, foi calculado o coeficiente de absorção para cada uma das argamassas - Tabela 6.

Tabela 5. Quantidade de água (ml) absorvida pelas argamassas no ensaio de absorção de água sob baixa pressão

| Argamassa | 5 min | 10 min | 15 min | 30 min | 60 min |
|-------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| REF-AN | 0.9 | 1.7 | 2.5 | 4.0 | 7.1 |
| AR-50% | 1.6 | 2.7 | 3.8 | 6.7 | 8.4 |
| AR-100% | 1.3 | 2.1 | 2.9 | 4.8 | 8.8 |
| ARC-5h-50% | 0.5 | 0.9 | 1.2 | 2.1 | 3.3 |
| ARC-5h-100% | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.4 | 2.9 |
| ARC-5d-50% | 1.1 | 1.7 | 2.0 | 3.0 | 5.4 |
| ARC-5d-100% | 2.0 | 3.4 | 4.1 | 7.9 | 11.2 |

Tabela 6. Coeficiente de absorção das argamassas resultante do ensaio de absorção de água sob baixa pressão

| Agregado | Coeficiente de absorção (kg/(m ² .min ^{0.5})) | | |
|----------|--|--------|--------|
| | Não carbonatado | ARC-5h | ARC-5d |
| REF-AN | 1.3 | - | - |
| AR-50% | 1.5 | 0.6 | 1.0 |
| AR-100% | 1.6 | 0.5 | 2.0 |

Pode-se observar que a introdução de agregados reciclados não carbonatados aumenta a absorção de água das argamassas, verificado pelo aumento do coeficiente de absorção (15% e 23% para taxas de substituição de 50% e 100%, respetivamente). No entanto, a substituição do AN por ARC diminui consideravelmente a absorção de água por parte das argamassas. Esta diminuição é mais evidente para as argamassas que possuem AR carbonatados por 5 horas; para taxas de substituição de 50% e 100%, esta diminuição é de cerca de 60% e 67%, respetivamente, comparativamente às argamassas com AR não carbonatados. Desta forma, a carbonatação dos agregados produziu um efeito bastante positivo na diminuição da absorção de água das argamassas aplicadas em suporte de tijolo cerâmico.

3.6. Suscetibilidade à fissuração

As argamassas aplicadas em tijolo cerâmico foram analisadas visualmente diariamente quanto à formação e aparecimento de fissuras visíveis na sua superfície. Apenas as argamassas que possuem 100% de AR não carbonatados e carbonatados durante 5 dias apresentaram fissuras visíveis (Figura 8) devendo-se ao teor elevado de resíduos incorporados, que possuem uma grande quantidade de finos. No entanto, a argamassa ARC-5h-100% não apresentou quaisquer fissuras (Figura 8), confirmando novamente o sucesso da carbonatação dos agregados por 5 horas na melhoria das suas propriedades, que se verifica nas características das argamassas.

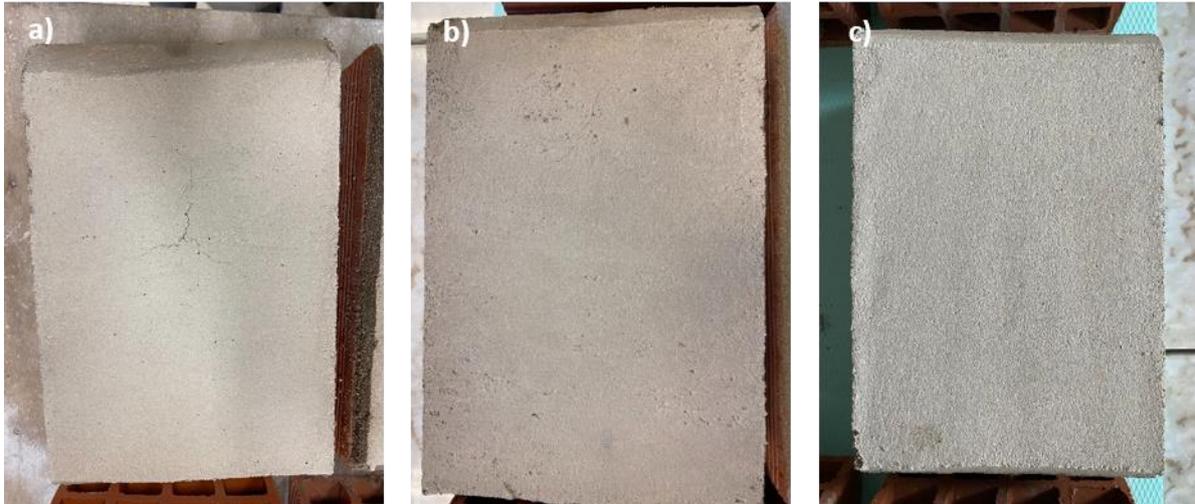


Figura 8. Ensaio de suscetibilidade à fissuração das argamassas: a) A-100%; b) AC-5d-100% e c) AC-5h-100%

4 | CONCLUSÕES

Um RCD comercializado por uma estação de tratamento e reciclagem portuguesa foi incorporado em argamassas cimentícias não estruturais, substituindo o agregado natural em 50% e 100%. Este agregado foi incorporado no seu estado natural, ou seja, após receção, e também após sujeito a carbonatações forçada e acelerada durante dois períodos de tempo distintos, 5 horas e 5 dias. As argamassas foram aplicadas em suporte de tijolo cerâmico, como argamassas de revestimento, e analisadas em termos do seu módulo de elasticidade, dureza superficial, aderência ao suporte, porosidade aberta, absorção de água sob baixa pressão e suscetibilidade à fissuração.

A carbonatação forçada e acelerada dos agregados reciclados atua como um pré-tratamento, conduzindo a um aumento da sua massa volúmica e conseqüente diminuição de porosidade e absorção de água. A incorporação de AR afectou o comportamento mecânico das argamassas, verificado pelo módulo de elasticidade, especialmente no caso de incorporação de ARC-5h. Verificou-se a diminuição da dureza superficial por durómetro das argamassas com AR não carbonatado. As argamassas com ARC apresentaram uma tendência para um ligeiro aumento da dureza superficial, mais evidente no caso das argamassas com ARC-5h. A introdução de AR não carbonatado produziu uma diminuição na aderência ao suporte das argamassas, que não foi melhorada com a carbonatação dos AR, por 5 horas ou 5 dias.

A porosidade aberta das argamassas com AR não carbonatado aumentou comparativamente à REF-AN. No entanto, a carbonatação dos AR por 5 horas produziu uma diminuição da porosidade das argamassas. Por outro lado, argamassas com AR sujeito a carbonatação por um período mais extenso, de 5 dias, apresentaram porosidade aberta superior às argamassas com AR não carbonatados. De modo similar, a carbonatação dos AR diminuiu a absorção de água das argamassas comparativamente às argamassas com AR não carbonatados, sendo esta diminuição superior para as argamassas com ARC-5h. Ainda, argamassas com incorporação de AR não carbonatado e carbonatado por 5 dias em taxa de substituição de 100% apresentaram fissuras visíveis. No entanto, argamassas com ARC-5h não evidenciaram esta tendência, não tendo apresentado quaisquer fissuras.

Assim, dos resultados obtidos, pode afirmar-se que os AR podem ser positivamente influenciados por uma cura de CO₂ durante curtos períodos. Este pré-tratamento pode melhorar as propriedades dos AR e, ao mesmo tempo, capturar e armazenar CO₂, tendo benefícios ambientais muito importantes. É assim relevante otimizar o período e as condições de carbonatação.

Agradecimentos

Os autores prestam agradecimento ao laboratório colaborativo c5Lab - *Sustainable Construction Materials Association*, ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), e à unidade de investigação CERIS do Instituto Superior Técnico (IST) pelo apoio prestado a esta investigação.

Referências

- [1] Directorate-General for Environment (European Commission), "Guidance on classification of waste according to EWC-Stat categories Supplement to the Manual for the Implementation of the Regulation (EC)," no. 2150, p. 82, 2010.
- [2] CEMBUREAU (2013). "The role of cement in the 2050 low carbon economy". The European Cement Association.
- [3] M. Á. Sanjuán, C. Andrade, P. Mora, and A. Zaragoza, "Carbon dioxide uptake by mortars and concretes made with Portuguese cements," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 2, 2020, doi: 10.3390/app10020646.
- [4] B. Zhan, C. S. Poon, Q. Liu, S. Kou, and C. Shi, "Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 67, pp. 3–7, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.008.
- [5] B. J. Zhan *et al.*, "Carbonation and CO₂ uptake of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 67, pp. 7880–7887, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116743.
- [6] C. Pade and M. Guimaraes, "The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 9, pp. 1348–1356, 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.06.009.
- [7] J. Zhang, C. Shi, Y. Li, X. Pan, C. S. Poon, and Z. Xie, "Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 1–7, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.087.
- [8] L. Li, J. Xiao, D. Xuan, and C. S. Poon, "Effect of carbonation of modeled recycled coarse aggregate on the mechanical properties of modeled recycled aggregate concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 89, pp. 169–180, 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.02.018.
- [9] R. Infante Gomes *et al.*, "Mortars with CDW Recycled Aggregates Submitted to High Levels of CO₂," *Infrastructures*, vol. 6, no. 159, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/infrastructures6110159>.
- [10] EN 12504-4, *Testing concrete in structures - Parte 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*. CEN, 2004.
- [11] ASTM D2240-00, *Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness*. ASTM, 2000.
- [12] EN 1015-12, *Methods of test for mortar for masonry - Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates*. CEN, 2016.
- [13] EN 1936, *Natural stone test methods. Determination of real density and apparent density and total and partial open porosity*. CEN, 2007.
- [14] Fe Pa 39, *Ficha de Ensaio. Revestimentos de Paredes: Ensaio de absorção de água sob baixa pressão*. LNEC, 2002.
- [15] A. Gholizadeh-Vayghan, A. Bellinkx, R. Snellings, B. Vandoren, and M. Quaghebeur, "The effects of carbonation conditions on the physical and microstructural properties of recycled concrete coarse aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 257, p. 119486, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119486.