

# Argamassas com agregados reciclados de RCD submetidos a carbonatação forçada

## Avaliação do seu comportamento em aplicações em suporte de tijolo

Ricardo Infante Gomes c5Lab – Sustainable Construction Materials Association, [rgomes@c5lab.pt](mailto:rgomes@c5lab.pt)

Cinthia Maia Pederneiras c5Lab – Sustainable Construction Materials Association

Catarina Brazão Farinha c5Lab – Sustainable Construction Materials Association

Rosário Veiga Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Jorge de Brito CERIS – Instituto Superior Técnico

Paulina Faria Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

*A indústria da construção é responsável por um terço dos resíduos produzidos na União Europeia. A substituição de areia natural nos materiais de construção, tais como betões ou argamassas, por resíduos de construção e demolição (RCD) é vista como uma alternativa favorável, já que aumenta o ciclo de vida dos resíduos e reduz o uso de recursos naturais. Estes agregados têm algum potencial de carbonatação e capacidade para a captura de CO<sub>2</sub>. Os RCD, em contacto com o CO<sub>2</sub>, reagem quimicamente através da carbonatação, o que contribui para o aumento da sua massa volúmica e redução da porosidade. Assim, os 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 expostos a um elevado nível de CO<sub>2</sub> durante cinco horas e por cinco dias antes de serem incorporados em argamassas, substituindo 50 % e 100 % (em volume) do agregado natural.*



O setor da construção é responsável por uma parte significativa das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a nível global, e ainda pela geração de grandes quantidades de resíduos. Assim, tem surgido um interesse crescente neste setor com vista à redução do seu impacto ambiental. Os resíduos de construção e demolição (RCD) representam 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 (AN). Não obstante, a sua utilização como AR é ainda limitada, nomeadamente, porque estes materiais reduzem o desempenho dos materiais nos quais são incorporados.

O cimento é obtido através da moagem de clínquer, que por sua vez resulta da calcinação a altas temperaturas de marga calcária, produzindo quantidades consideráveis de CO<sub>2</sub>, que são emitidas para a atmosfera [2]. No entanto, qualquer material à base de cimento sofre carbonatação, reação química em que a cal livre reage com o CO<sub>2</sub>, captando-o e formando carbonato de cálcio. Desta forma, é possível afirmar que parte do CO<sub>2</sub> emitido durante o processo de fabrico do cimento é reabsorvido por estes materiais [3].

Vários estudos [4-8] referem que a carbonatação forçada e acelerada provoca efeitos positivos nas características dos AR, comparando com os não-carbonatados, melhorando desta forma as suas propriedades e, conseqüentemente, as dos materiais nos quais são incorporados. Simultaneamente, há um contributo para a captura e o armazenamento de CO<sub>2</sub> (*carbon capture and storage – CCS*).

Este artigo apresenta os resultados da avaliação do desempenho de argamassas de cimento para revestimento, aplicadas em suporte cerâmico, formuladas com AR sujeitos a carbonatação forçada e acelerada durante cinco horas e cinco dias. Este estudo integra o projeto WP10B – Forced and accelerated sequestration of CO<sub>2</sub> by CDW to incorporate as aggregates in mortars and concrete – do laboratório colaborativo c5Lab (*Sustainable Construction Materials Association*), que pretende otimizar a captura de CO<sub>2</sub> através

de RCD para posterior incorporação como agregados em argamassas e betões, compensando parte do CO<sub>2</sub> emitido pela indústria cimenteira.

## MATERIAIS E METÓDOS

### Materiais

O RCD utilizado nesta pesquisa foi previamente britado e crivado em central de gestão de resíduos, e o AR utilizado foi caracterizado por Infante Gomes *et al* [9], tendo dimensões inferiores a 2 mm e a curva granulométrica apresentada na figura 1. Verifica-se ser constituído por 42 %, em massa, de produtos de betão.

O RCD foi incorporado tal qual como fornecido pela central (AR), 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

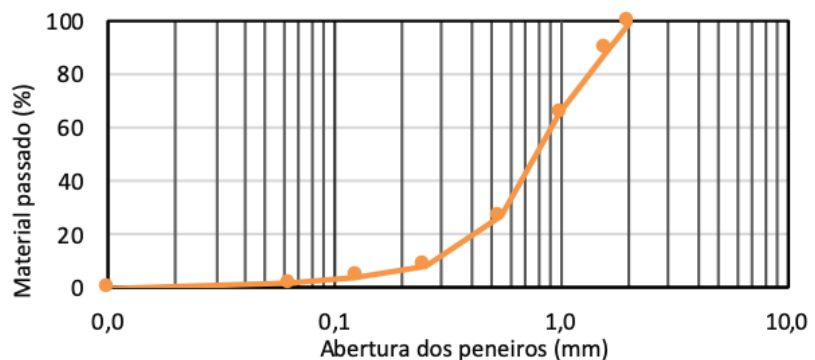
uma concentração de CO<sub>2</sub> de 25 %, durante cinco horas (ARC-5h) e após cinco dias (ARC-5d). Foi utilizado um cimento Portland CEM II/B-L 32,5 N (CIMPOR). O AN utilizado foi uma areia calibrada (Areipor). O traço volumétrico da argamassa foi de 1:4 (ligante: agregado).

As argamassas foram aplicadas sobre tijolo cerâmico, processo constituído por diversas etapas (figura 2), originando provetes simulando um reboco.

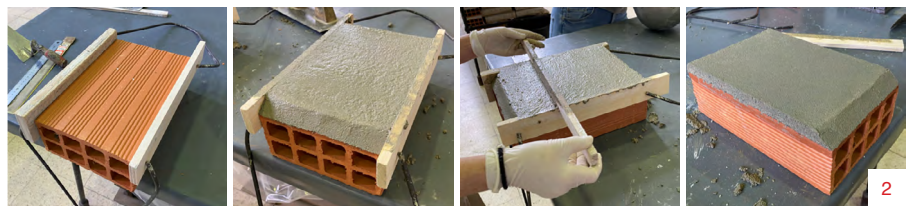
Na tabela 1 são apresentadas as formulações de argamassas realizadas.

1 | Curva de distribuição granulométrica dos agregados reciclados.

2 | Aplicação de argamassa simulando reboco em tijolo cerâmico.



1



2

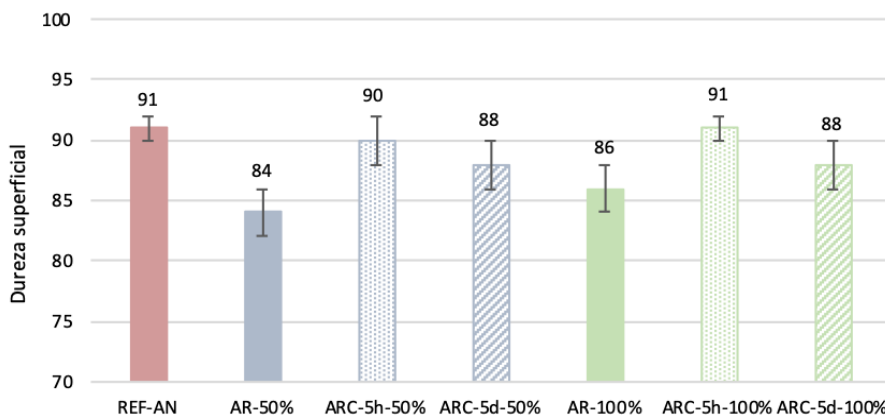
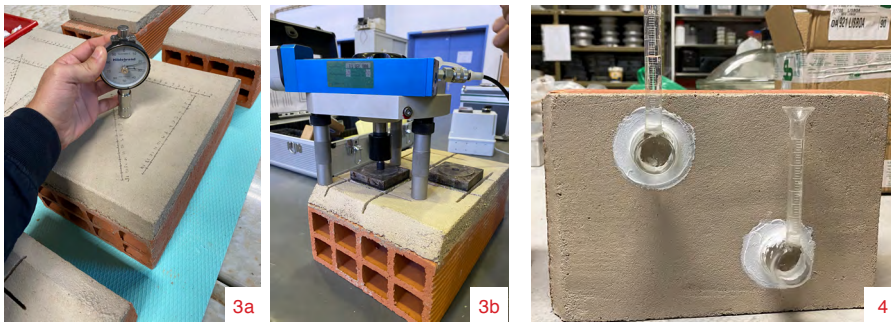
Tabela 1 | Composição das argamassas realizadas (em traço volumétrico)

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

3 | Ensaios de dureza superficial por durômetro (a) e de aderência ao suporte (b).

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

5 | Resultados de dureza superficial por durômetro das argamassas.



5

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

Ensaio	Norma
Módulo de elasticidade dinâmico	EN 12504-4 [10]
Dureza superficial	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	–

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

Agregado	Módulo de elasticidade (GPa)		
	Não carbonatado (AR)	Carbonatado 5 h (ARC-5h)	Carbonatado 5 d (ARC-5d)
Areia natural AN	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

## Métodos

Na tabela 2 estão compilados os ensaios realizados e as normas utilizadas, alguns dos quais são ilustrados nas figuras 3 e 4.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Módulo de elasticidade por velocidade de propagação de ultrassons

O módulo de elasticidade dinâmico das argamassas é 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 apresentam uma diminuição do módulo de elasticidade de 7 % e 10 %, respectivamente, em comparação com a REF-AN.

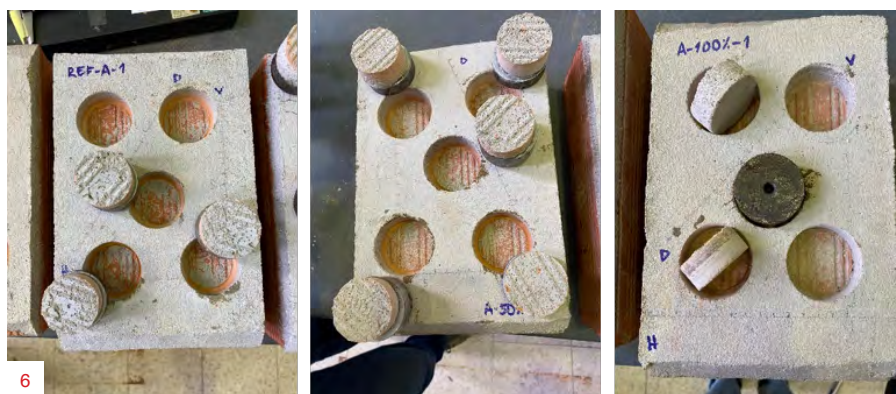
Após a carbonatação durante cinco horas, ocorre um aumento do módulo de elasticidade das argamassas, tanto para taxas de substituição de 50 % como de 100 %, em relação às argamassas com agregado não carbonatado e mesmo à argamassa com agregado natural. Contudo, quando formuladas com agregados submetidos a carbonatação por cinco dias, verifica-se uma diminuição do módulo de elasticidade das argamassas em comparação com as que possuem agregados não carbonatados.

### Dureza superficial por durômetro

As argamassas formuladas com 50 % e 100 % de AR possuem uma dureza superficial inferior à argamassa formulada apenas com AN (figura 5). O uso de AR carbonatados 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.

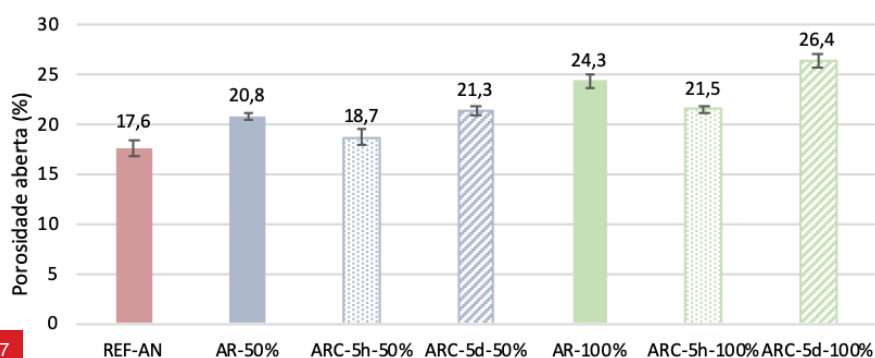
### Aderência ao suporte

Na tabela 4 são apresentados os resultados da aderência ao suporte. Observa-se que a argamassa de referência é a que apresenta maiores valores de aderência. Por sua vez, esta diminui com a introdução de agregado reciclado não carbonatado. A incorporação de agregados carbonatados diminui drasticamente a aderência ao suporte das argamassas, com exceção



6 | Padrão de rotura adesiva das argamassas.

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



da argamassa com incorporação de 50 % de ARC-5d. Todas as argamassas apresentaram um padrão de rotura adesivo (figura 6).

### Porosidade aberta

As argamassas produzidas com AR não carbonatado possuem uma porosidade aberta consideravelmente superior à REF-AN (figura 7). A carbonatação do AR por cinco horas diminui a porosidade aberta das argamassas em cerca de 10 % e 12 %, para 50 % e 100 % de substituição, respetivamente, por comparação com as que possuem AR não carbonatado, o que é consistente com o aumento de massa volúmica dos agregados reciclados com a carbonatação [4, 9, 15]. Contudo, a porosidade aberta das argamassas com agregados ARC-5d é superior à das formuladas com agregados não carbonatados.

### 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). Pode-se observar que o uso de AR não carbonatado aumenta a absorção de água das argamassas. No entanto, a substituição do AN por ARC diminui consideravelmente a absorção de água. Esta diminuição é mais evidente para as argamassas que possuem AR carbonatados por cinco 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.

Tabela 4 | Aderência ao suporte das argamassas

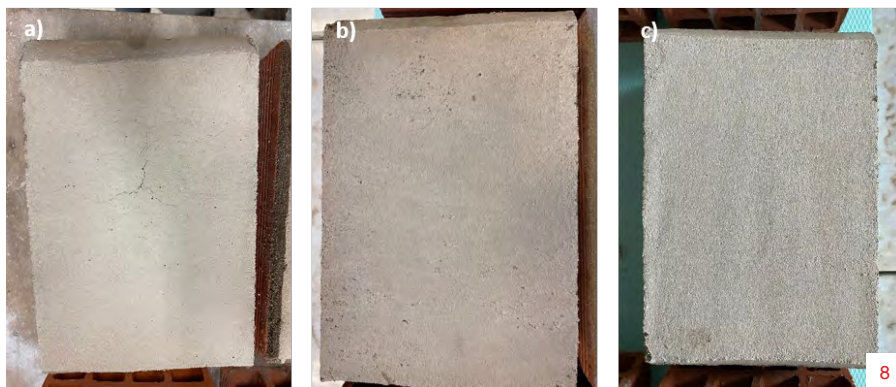
Agregado	Módulo de elasticidade (GPa)		
	Não carbonatado (AR)	Carbonatado 5 h (ARC-5h)	Carbonatado 5 d (ARC-5d)
Areia natural AN	0,53 ± 0,11	–	–
50 % AR	0,26 ± 0,07	0,05 ± 0,00	0,20 ± 0,05
100 % AR	0,36 ± 0,00	0,13 ± 0,02	0,03 ± 0,00

Tabela 5 | Quantidade de água absorvida (em mililitros) 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 <sup>2</sup> .min <sup>0.5</sup> ))		
	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



8 | Ensaio de suscetibilidade à fissuração das argamassas: a) AR-100 %; b) ARC-5h-100 % e c) ARC-5h-100 %

## Suscetibilidade à fissuração

As argamassas aplicadas em tijolo cerâmico foram analisadas quanto ao aparecimento de fissuras visíveis na sua superfície. Apenas as argamassas que possuem 100 % de AR não carbonatados e carbonatados durante cinco dias apresentaram fissuras visíveis (figura 8). No entanto, a argamassa ARC-5h-100 % não apresentou quaisquer fissuras (figura 8), confirmando novamente o sucesso da carbonatação dos agregados por cinco horas na melhoria das suas propriedades, que se verifica nas características das argamassas.

## CONCLUSÕES

Um RCD foi incorporado em argamassas cimentícias não estruturais, após moagem e crivagem, substituindo o agregado natural em 50 % e 100 %. Este agregado foi incorporado no seu estado natural e também após sujeito a carbonatações forçada e acelerada durante cinco horas e por cinco dias. As argamassas foram aplicadas em suporte de tijolo cerâmico e analisadas segundo o seu módulo de elasticidade dinâmico, a dureza superficial, a aderência ao suporte, a porosidade aberta, a absorção de água sob baixa pressão e a suscetibilidade à fissuração.

A carbonatação forçada e acelerada dos RCD conduz a um aumento da sua massa volúmica e diminuição de porosidade e absorção de água. A incorporação de AR afetou o comportamento mecânico das argamassas, verificado pelo módulo de elasticidade. Constatou-se a diminuição da dureza superficial por durómetro das argamassas com AR não carbonatado. As argamassas com ARC apresentaram

tendência para um ligeiro aumento da dureza superficial. O uso de AR não carbonatado produziu diminuição na aderência ao suporte das argamassas, que não foi melhorada com a carbonatação dos AR.

A porosidade aberta das argamassas com AR não carbonatado aumentou comparativamente à REF-AN. No entanto, a carbonatação dos AR por cinco horas produziu diminuição da porosidade das argamassas. Por outro lado, argamassas com AR sujeito a carbonatação durante cinco 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. Acresce ainda que argamassas com incorporação de AR não carbonatado e carbonatado por cinco dias em taxa de substituição de 100% apresentaram fissuras visíveis, enquanto argamassas com ARC-5h não evidenciaram esta tendência, não apresentando quaisquer fissuras.

Assim, dos resultados obtidos conclui-se que os AR podem ser positivamente influenciados por uma cura de CO<sub>2</sub> durante curtos períodos. Este pré-tratamento pode melhorar as propriedades dos AR e, ao mesmo tempo, capturar e armazenar CO<sub>2</sub>, 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 e à unidade de investigação CERIS, do Instituto Superior Técnico, pelo apoio prestado nesta investigação ■

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Direção-Geral do Ambiente (2010). Guidance on classification of waste according to EWC-Stat categories Supplement to the Manual for the Implementation of the Regulation, n.º 2150. Comissão Europeia, p. 82.
- [2] Cembureau (2013). The role of cement in the 2050 low carbon economy. The European Cement Association.
- [3] Sanjuán, M. A., *et al* (2020). Carbon dioxide uptake by mortars and concretes made with Portuguese cements. *Appl. Sci.*, vol. 10, n.º 2, doi: 10.3390/app10020646.
- [4] Zhan, B. *et al* (2014). Experimental study on CO<sub>2</sub> curing for enhancement of recycled aggregate properties. *Construction and Building Material*, vol. 67, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.008, p. 3-7.
- [5] Zhan, B. J. *et al* (2020). Carbonation and CO<sub>2</sub> uptake of concrete. *Construction and Building Material*, vol. 67, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116743, p. 7880-7887.
- [6] Pade, C., Guimarães, M. (2007). The CO<sub>2</sub> uptake of concrete in a 100 year perspective. *Cement Concret Research*, vol. 37, n.º 9, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.06.009, p. 1348-1356.
- [7] Zhang, J. *et al* (2015). Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar. *Construction and Building Material*, vol. 98, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.087, p. 1-7.
- [8] Li, L. *et al* (2018). Effect of carbonation of modeled recycled coarse aggregate on the mechanical properties of modeled recycled aggregate concrete, *Cement Concret Research*, vol. 89, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.02.018, p. 169-180.
- [9] Gomes, R. I. *et al* (2021). Mortars with CDW Recycled Aggregates Submitted to High Levels of CO<sub>2</sub>. *Infrastructures*, vol. 6, n.º 159, doi: https://doi.org/10.3390/infrastructures6110159.
- [10] EN 12504-4 (2004). *Testing concrete in structures – Parte 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*. CEN.
- [11] ASTM D2240-00 (2000). *Standard Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness*. ASTM.
- [12] EN 1015-12 (2016). *Methods of test for mortar for masonry – Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates*. CEN.
- [13] EN 1936 (2007). *Natural stone test methods. Determination of real density and apparent density and total and partial open porosity*. CEN.
- [14] Fe Pa 39 (2002). *Ficha de Ensaio. Revestimentos de Paredes: Ensaio de absorção de água sob baixa pressão*. LNEC.
- [15] Gholizadeh-Vayghan, A. *et al* (2020). The effects of carbonation conditions on the physical and microstructural properties of recycled concrete coarse aggregates. *Construction Building Materials*, vol. 257, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119486, p. 119486.