

## **Argamassas com incorporação de agregados reciclados de RCD sujeitos a fixação de CO<sub>2</sub>**

**Ricardo Infante Gomes**

*c<sup>5</sup>Lab - Sustainable Construction Materials Association, Linda-a-Velha, Portugal, rgomes@c5lab.pt*

**Catarina Brazão Farinha**

*c<sup>5</sup>Lab - Sustainable Construction Materials Association, Linda-a-Velha, Portugal, cfarinha@c5lab.pt*

**Rosário Veiga**

*Departamento de Edifícios, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, rveiga@lnec.pt*

**Jorge de Brito**

*CERIS, Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, jb@civil.ist.utl.pt*

**Paulina Faria**

*CERIS e Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal, mpr@fct.unl.pt*

### **Resumo**

O aquecimento global é causado pela quantidade crescente de gases com efeito de estufa na atmosfera, assumindo-se como uma das maiores ameaças ambientais a nível mundial. Assim, têm surgido esforços globais para a sua mitigação, nomeadamente através da redução das emissões de gases, particularmente do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Diversas estratégias de captura e armazenamento do CO<sub>2</sub> emitido têm sido estudadas e vindo a ser implementadas.

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são gerados em grande abundância e têm um potencial diversificado no sector da construção, que é a indústria que os gera e tem maior responsabilidade na sua gestão. Não obstante os estudos já desenvolvidos, a sua utilização em materiais de construção, como argamassas, é ainda limitada. Esta incorporação reduz o volume de matéria-prima natural utilizada nestes produtos, abrandando assim o esgotamento de recursos naturais, ao mesmo tempo que reduz a energia que incorporam e aumenta o seu ciclo de vida. Complementarmente, muitos RCD têm potencial para captação de CO<sub>2</sub> produzido pela indústria, por processos químicos ou físicos.

Este artigo visa apresentar os primeiros resultados de um estudo de avaliação de desempenho de agregados reciclados após submissão a carbonatação forçada e acelerada, com o objectivo de contribuir para a captação de CO<sub>2</sub>. São estudadas argamassas cimentícias fabricadas com agregados naturais (argamassas de referência) e com agregados reciclados antes e após carbonatação, com um traço volumétrico de 1: 4 (cimento: agregado). Pretende-se, desta forma, contribuir para a captação de parte das emissões de CO<sub>2</sub> da indústria cimentícia Portuguesa, dotando-a de mecanismos que permitam torná-la mais sustentável em termos energéticos e ambientais. Adicionalmente, pretende-se contribuir para a diminuição da extracção de recursos naturais não renováveis, na forma de agregados naturais, por parte do sector de construção.

**Palavras-chave:** RCD; Argamassas sustentáveis; Captura e armazenamento de carbono; Agregados reciclados

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a concentração de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na atmosfera tem vindo a aumentar exponencialmente. A elevada concentração deste gás, bem como de outros gases com efeito de estufa, é responsável pelo fenómeno conhecido como aquecimento global, sendo uma das principais ameaças globais e urge a necessidade de medidas para o combater.

De acordo com a Comissão Europeia, 25 a 30% dos resíduos produzidos na Europa provêm da indústria da construção, conhecidos por resíduos de construção e demolição (RCD). Estes encontram-se disponíveis em grandes quantidades com baixos custos de aquisição [1, 2]. A sua incorporação em produtos de construção, tais como argamassas e betões, como agregados reciclados, tem um impacto positivo na redução da exploração de recursos naturais, nomeadamente na indústria dos agregados naturais, aumentando, ao mesmo tempo, o ciclo de vida destes produtos.

A indústria cimenteira é responsável pela produção do componente mais importante do betão, que é um dos materiais mais utilizados no sector da construção. Estima-se, a emissão de cerca de 650 a 800 kg de  $\text{CO}_2$  por cada tonelada de cimento produzida [3]. Estas emissões ocorrem durante todo o processo de fabrico do cimento, desde a extracção das matérias-primas até à sua expedição. Adicionalmente, existe um consumo exponencial de recursos naturais finitos e escassos com a correspondente repercussão sobre o ambiente. Desta forma, estes impactes têm sido alvo de mudanças e medidas tomadas pelo sector da construção.

Nas argamassas cimentícias, o cimento actua como ligante sofrendo hidratação, mas também carbonatação, reacção na qual a cal livre reage com o dióxido de carbono formando carbonato de cálcio. Assim, poder-se-á assumir que qualquer material cimentício é capaz de capturar parte do  $\text{CO}_2$  emitido durante a fase de produção de cimento [4].

A utilização de resíduos de construção e demolição como agregados (agregados reciclados) em argamassas e betões tem sido objecto de vários estudos, com resultados promissores. No entanto, geralmente, estes agregados reduzem o desempenho destes materiais. Diversos estudos [5–9] afirmam que a incorporação de agregados de RCD sujeitos a carbonatação forçada em argamassas e betões melhora as suas características em comparação com os não carbonatados, enquanto estes últimos contribuem para a captura e armazenamento de  $\text{CO}_2$  (CCS - *carbon capture and storage*).

Refira-se que, nos estudos mencionados [5–9], são utilizados resíduos formulados em laboratório ou apenas constituídos por materiais de matriz cimentícia. Contrariamente, o presente estudo visa a incorporação de agregados reciclados provenientes de estações de tratamento e reciclagem. Este estudo integra o projecto WP10B - *Forced and accelerated sequestration of  $\text{CO}_2$  by CDW to incorporate as aggregates in mortars and concrete* - do laboratório colaborativo c<sup>5</sup>Lab (Sustainable Construction Materials Association), que pretende otimizar a captura de  $\text{CO}_2$  através de RCD para posterior incorporação como agregados em argamassas e betões, compensando parte do  $\text{CO}_2$  emitido pela indústria cimenteira.

Este artigo apresenta os primeiros resultados experimentais da avaliação do desempenho de argamassas formuladas com agregados reciclados de RCD sujeitos a carbonatação forçada e acelerada.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Um RCD comercializado por uma estação de tratamento e reciclagem portuguesa foi incorporado em argamassas em percentagens de substituição de agregado natural de 50 e 100%, em volume. Este resíduo é designado neste artigo por A-RCD. Este agregado reciclado corresponde a uma mistura de partículas com dimensões inferiores a 2 mm, que inclui uma quantidade de betão, produtos de betão, argamassa e unidades de alvenaria de betão de cerca de 42%, em massa, sendo estes os materiais requeridos para a carbonatação forçada e acelerada desses agregados.

A incorporação do A-RCD em argamassas cimentícias foi realizada no seu estado natural, ou seja, não carbonatado, e após este ter sido submetido a carbonatação forçada numa câmara de carbonatação durante 5 dias a 23 °C, 60% de humidade relativa (HR) e 25% de concentração de CO<sub>2</sub>. O ligante utilizado na preparação das argamassas foi cimento Portland tipo CEM II/B-L 32.5 N, da empresa CIMPOR. O agregado natural utilizado foi uma combinação de diversas areias calibradas da Areipor - Areias Portuguesas. O traço volumétrico definido para estas argamassas não estruturais foi 1:4 (ligante: agregado).

A curva granulométrica utilizada na formulação das argamassas foi a de A-RCD, uma vez que esta é considerada adequada para a formulação de argamassas. Adicionalmente, a utilização de resíduos sem qualquer tratamento adicional (como a alteração da sua curva granulométrica) contribui para a viabilidade da sua utilização por parte da indústria. Por conseguinte, foi utilizada a curva exacta deste agregado reciclado. Assim, a curva da argamassa de referência (REF-A), sem incorporação de RCD, foi adaptada à curva granulométrica de A-RCD.

Inicialmente, para efectuar a amassadura da argamassa (realizada de acordo com a Norma Europeia EN 1015-2 [10]), a massa de cada material é obtida numa balança com 0,1 g de precisão. De seguida, os constituintes são colocados no recipiente do misturador de laboratório previamente humedecido. O recipiente é ligado ao misturador, que começa a trabalhar em modo automático a uma baixa velocidade. Durante os 30 segundos iniciais, e com o mesmo movimento, a água é vertida para dentro do recipiente. Após 2 minutos e meio, a misturadora é parada e as paredes do recipiente raspadas, de modo a que todo o material integre a mistura. Finalmente, a misturadora é iniciada novamente, à mesma velocidade, durante mais 30 segundos.

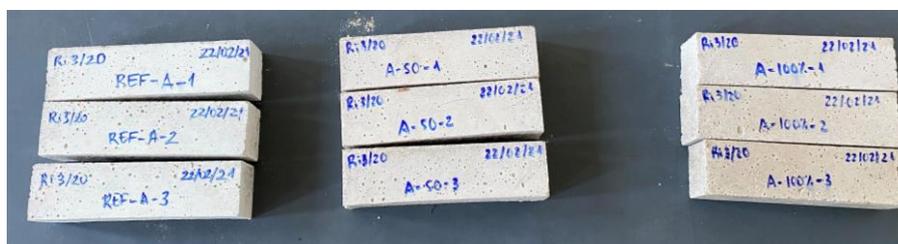


Figura 1. Provetes de argamassa: de referência (REF-A); com 50% de A-RCD (A-50%) e com 100% de A-RCD (A-100%)

As argamassas foram aplicadas em moldes metálicos prismáticos com 160 mm x 40 mm x 40 mm (Fig. 1) e os provetes mantidos em condições controladas até serem ensaiados. Nos primeiros 2 dias, os moldes foram mantidos a uma temperatura de 20±2 °C e uma HR de 95±5%. Posteriormente, os provetes foram desmoldados e mantidos nas mesmas condições durante 7 dias. Após este período, a HR foi reduzida para 65±5% e a temperatura mantida constante.

## 2.2 Métodos

A trabalhabilidade das argamassas foi analisada através do ensaio de consistência por mesa de espalhamento. Este ensaio consiste em colocar a argamassa fresca num molde troncocónico em duas camadas, cada uma das quais compactada com 10 pancadas. O molde é cuidadosamente removido e são executados 15 golpes na mesa de espalhamento a uma taxa de um golpe por segundo. Finalmente, com um paquímetro, mede-se o diâmetro da argamassa espalhada em duas direcções ortogonais. Cada resultado deste ensaio é dado pela média de duas medições realizadas na amostra de argamassa.

O ensaio de massa volúmica aparente no estado fresco é realizado de acordo com a Norma Europeia EN 1015-6 [11]. Este consiste em colocar a argamassa fresca dentro de um recipiente cilíndrico, com um volume conhecido, até metade da sua capacidade. Seguidamente, este é compactado oscilando o recipiente em quatro direcções alternadas, deixando o recipiente de um lado apoiado, levantando o lado oposto até uma altura de 3 cm, deixando-o cair, e repetindo para cada uma das três direcções restantes. O recipiente é então cheio e compactado novamente de forma igual. O excesso de argamassa é removido raspando o bordo superior do contentor com uma talocha. Finalmente, todo o conjunto de argamassa e recipiente é pesado. O resultado deste ensaio consiste em medir a massa de uma amostra desta mistura, para um determinado volume, com uma certa compactação.

O ensaio de massa volúmica no estado endurecido foi realizado de acordo com a Norma Europeia EN 1015-10 [12]. A determinação é realizada através da medição do comprimento, altura e largura de cada um dos seis provetes e de uma balança de precisão de 0,001 g para determinar a sua massa.

Para determinação do módulo de elasticidade dinâmico, foi utilizado o método de frequência por ressonância, com base na norma EN 14146[13] e equipamento específico. Esta norma determina a frequência de ressonância fundamental de um material para uma vibração induzida na sua direcção longitudinal. O ensaio foi realizado em seis provetes prismáticos, tendo em conta os dados geométricos e a massa volúmica da argamassa endurecida. O módulo de elasticidade [N/mm<sup>2</sup>] pode ser calculado por:

$$Me = (2 \times L \times f)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad (1)$$

Nesta equação, L é o comprimento da amostra (m), f a frequência de ressonância longitudinal (Hz),  $\rho$  a massa volúmica (N/mm<sup>3</sup>) e g a aceleração da gravidade (9.806655 m/s<sup>2</sup>).

O módulo de elasticidade por propagação de velocidade de ultra-sons avalia a compacidade e rigidez das argamassas. O ensaio de velocidade de propagação ultra-sónica tem por base a norma EN 12504-4 [14], tendo sido efectuado aos provetes prismáticos. Assim sendo, um impulso de vibrações longitudinais é produzido por um transdutor electroacústico que é mantido sobre a superfície de ensaio. Este impulso atravessa um comprimento de percurso até um segundo transdutor, sendo convertido num sinal eléctrico. 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 de ensaio (método indirecto) do provete. O módulo de elasticidade das argamassas (GPa) pode ser calculado através de:

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

$$K = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}, \nu = 0.2 \quad (3)$$

Foi realizado o ensaio de resistência à flexão, com base na norma EN 1015-11 [15]. Para este ensaio, a máquina de tracção universal foi preparada com a introdução de uma célula de carga de 2 kN associada ao dispositivo de flexão em três pontos. O *software* do equipamento de ensaio, que incrementa a carga a uma velocidade de 0,2 mm/min, foi iniciado, obtendo-se um gráfico da força aplicada (N) em função do tempo (s), e a força máxima aplicada é registada.

Com metade de cada provete resultante do ensaio de resistência à tracção por flexão, foi realizado o ensaio de resistência à compressão com base na norma EN 1015-11 [15]. De forma semelhante, o equipamento foi preparado com a introdução da célula de carga no dispositivo de compressão de prismas com 40 mm de secção. Os valores da força aplicada em função do tempo foram registados, bem como a força compressiva máxima que ocorre antes da rotura. A força de compressão  $R_c$  (MPa) é obtida através do quociente entre a força máxima (N) obtida pelo *software* do equipamento e a secção de aplicação da carga (1600 mm<sup>2</sup>).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Consistência por espalhamento

Em argamassas não estruturais, como rebocos, a razão água/cimento (a/c) é definida tendo em conta a trabalhabilidade adequada requerida a estas argamassas. Os resultados da trabalhabilidade das argamassas, através da consistência por espalhamento, bem como a razão água / cimento, são apresentados na Tabela 1. Verificou-se que a incorporação do resíduo A-RCD, independentemente de se encontrar carbonatado ou não, aumenta a relação a/c das argamassas, para uma trabalhabilidade semelhante. A argamassa REF-A possui uma razão a/c de 1,03 e a A-100% uma relação de 1,21, registando um aumento de cerca de 17%. O incremento é tanto maior quanto maior for o volume de RCD incorporado. Tal pode dever-se à maior porosidade dos agregados reciclados (AR) em comparação com os agregados naturais. Assim, é necessário um maior volume de água para lubrificar estes agregados. Em termos de trabalhabilidade, ao comparar os RCD carbonatados e não carbonatados, não foram notadas diferenças que pudessem promover a redução de água nas misturas com agregados carbonatados. Esperava-se uma redução das necessidades de água com a carbonatação forçada destes agregados, devido à maior compacidade esperada, mas que não ocorreu.

Tabela 1. Resultados de consistência por espalhamento e razão água / cimento

Argamassa		Espalhamento (mm)	Razão água / cimento
Agregados não carbonatados	REF-A	162	1,03
	A-50%	162	1,06
	A-100%	161	1,21
Agregados carbonatados	AC-50%	163	1,06
	AC-100%	161	1,21

#### 3.2 Massa volúmica

A média de três medições da massa volúmica em estado fresco e da massa volúmica aparente em estado endurecido, aos 14 e 28 dias, para cada argamassa produzida é apresentada na Tabela 2. Observou-se que as argamassas com RCD apresentam massa volúmica em estado fresco ligeiramente inferior à da REF-A,

em cerca 7%. De 50% a 100% de RCD, a massa volúmica aparente também diminui. A carbonatação forçada, à semelhança do que aconteceu no ensaio de consistência, não afectou a massa volúmica.

Tabela 2. Resultados da massa volúmica em estado fresco e endurecido

Argamassa		Massa volúmica em estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	Massa volúmica aparente em estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> )	
			14 dias	28 dias
Agregados não carbonatados	REF-A	2060	1933 ± 70	1942 ± 4
	A-50%	1972	1902 ± 15	1886 ± 4
	A-100%	1917	1851 ± 50	1771 ± 10
Agregados carbonatados	AC-50%	1964	1900 ± 14	1865 ± 11
	AC-100%	1919	1796 ± 16	1802 ± 14

Observa-se, da mesma forma que o verificado para a massa volúmica em estado fresco, que a massa volúmica aparente dos provetes em estado endurecido decresce com o incremento da quantidade de resíduo incorporado. Esta redução, provavelmente devida à menor massa volúmica dos agregados reciclados em comparação com a da areia natural, é reduzida e corresponde a 2% no caso da argamassa A-50% e 9% para a A-100%.

### 3.3 Módulo de elasticidade dinâmico

Na Fig. 2, é apresentado o módulo de elasticidade por frequência de ressonância das argamassas. Como esperado, é maior para a argamassa de referência (REF-A) e diminui com o aumento da quantidade de RCD incorporada. As argamassas com 50% de resíduos A-RCD (não carbonatados) possuem um módulo de elasticidade de cerca de 12 GPa aos 28 dias, correspondendo a uma diminuição de 22% em comparação com a REF-A. A argamassa com 100% de incorporação de resíduos apresenta um módulo de elasticidade de cerca de 8,5 GPa, sendo metade do valor obtido para a argamassa de referência. Comparando os agregados carbonatados e não carbonatados, nota-se um ligeiro decréscimo quando se utilizou agregados carbonatados, com diferenças inferiores a 12%.

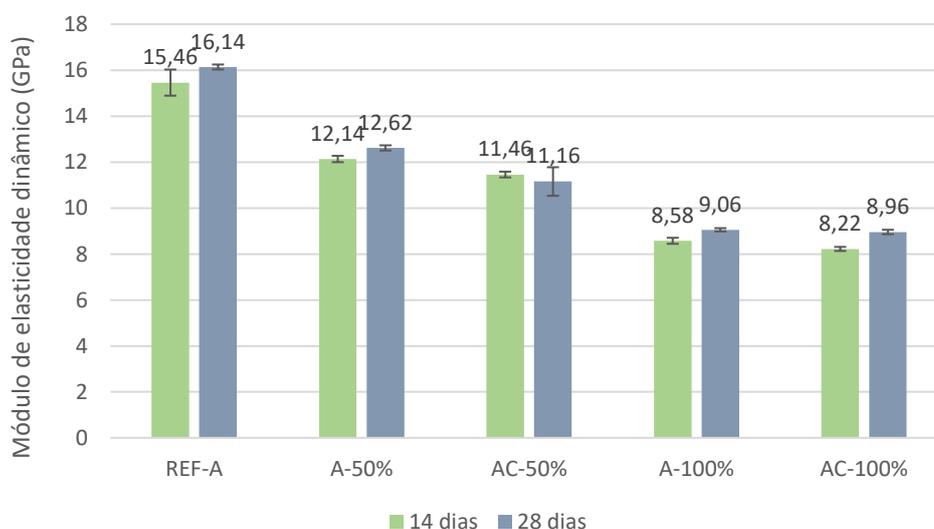


Figura 2. Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas aos 14 e 28 dias

### 3.4 Módulo de elasticidade por velocidade de propagação de ultra-sons

Na Tabela 3, é apresentado o módulo de elasticidade de cada argamassa obtido por ultra-sons. A tendência verificada é similar à obtida para o modelo de elasticidade dinâmico. A argamassa REF-A apresenta o valor mais elevado de módulo de elasticidade, em comparação com as argamassas com 50 e 100% de agregados não carbonatados ou carbonatados. Não obstante, em oposição ao método de frequência de ressonância, pelo método de velocidade de propagação de ultra-sons, não é evidente a tendência do decréscimo do módulo de elasticidade entre argamassas com agregados carbonatados e não carbonatados.

Tabela 3. Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

Argamassa		Idade (dias)	Velocidade (m/s)	Módulo de elasticidade (GPa)
Agregados não carbonatados	REF-A	14	2,6	12,1
	A-50%		2,4	9,9
	A-100%		2,1	7,2
	REF-A	28	2,6	11,7
	A-50%		2,5	10,6
	A-100%		2,1	7,3
Agregados carbonatados	AC-50%	14	2,2	8,5
	AC-100%		2,1	7,1
	AC-50%	28	2,4	10,0
	AC-100%		2,2	7,7

### 3.5 Resistência à tracção por flexão

A média dos três provetes ensaiados à resistência à tracção por flexão é apresentada na Fig. 3. Nota-se que as argamassas com 50% de A-RD (não carbonatados) apresentam uma ligeira diminuição quando comparadas com a argamassa REF-A: 5% aos 14 dias e 4% aos 28 dias. A argamassa com 100% de resíduos A-RCD (não carbonatados) apresenta uma resistência à flexão de 1,71 MPa e 2,42 MPa, correspondendo a uma diminuição de 18% e 30% aos 14 e 28 dias, respectivamente. Embora se tenha observado uma diminuição da resistência à tracção por flexão, os valores de resistência são adequados para utilizações não estruturais. Com efeito, a argamassa com 100% de resíduos possui uma resistência à flexão de quase 2,5 MPa aos 28 dias, sendo um valor elevado para argamassas não estruturais.

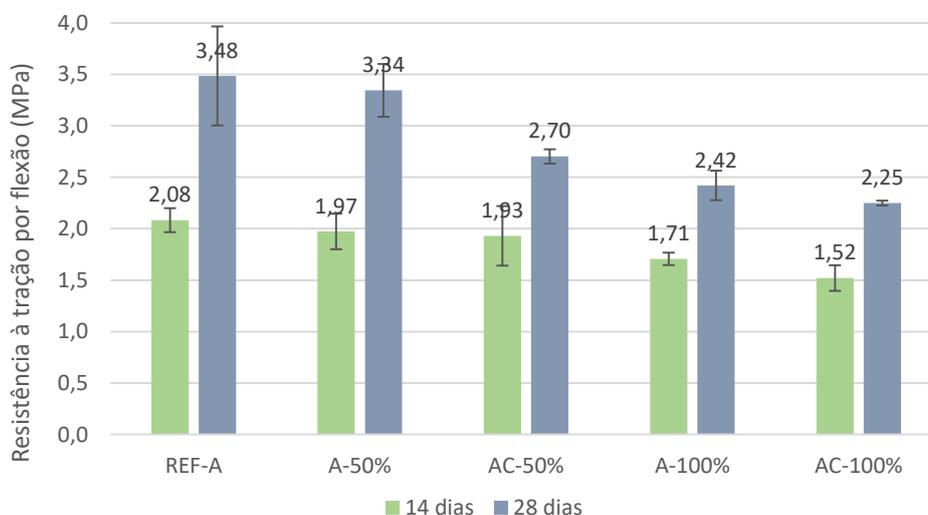


Figura 3. Resistência à tracção por flexão das argamassas aos 14 e 28 dias

Comparando os resultados das argamassas com os agregados carbonatados e não carbonatados, à semelhança do módulo de elasticidade, verifica-se uma diminuição da resistência à flexão com o tratamento de carbonatação forçada e acelerada. Estes resultados não estão de acordo com o que esperado, e que constam na literatura [16, 17, 18]. Poderá supor-se que a carbonatação não contribuiu para melhorias na porosidade e, conseqüentemente, em benefícios na resistência das argamassas. A possibilidade de as características mecânicas poderem ser reduzidas devido a um contacto menos eficiente entre o ligante e os agregados carbonatados deverá ser analisada.

### 3.6 Resistência à compressão

Os resultados do ensaio de resistência à compressão são apresentados na Fig. 4. Quanto aos agregados não carbonatados, verifica-se, aos 14 dias, uma ligeira diminuição da resistência à compressão: para argamassas com 50% de A-RCD, uma redução de 3% e, para a argamassa com 100% de resíduos, uma diminuição de 22%. Aos 28 dias, a argamassa com 50% de agregados reciclados aumenta a resistência à compressão em cerca de 0,3 MPa, apresentando um valor de 10,62 MPa e a argamassa com 100% de resíduos uma resistência de 9,29 MPa. À semelhança do obtido para a resistência à flexão, a resistência à compressão destas argamassas é elevada comparativamente a argamassas não estruturais habituais, com o mesmo traço ligante: agregado. A curva de distribuição granulométrica dos resíduos pode ser responsável por tais valores da resistência. Comparando os agregados não carbonatados com os carbonatados, aos 14 dias, foram encontradas pequenas diminuições de resistência para os agregados carbonatados, estando assim de acordo com os restantes ensaios.

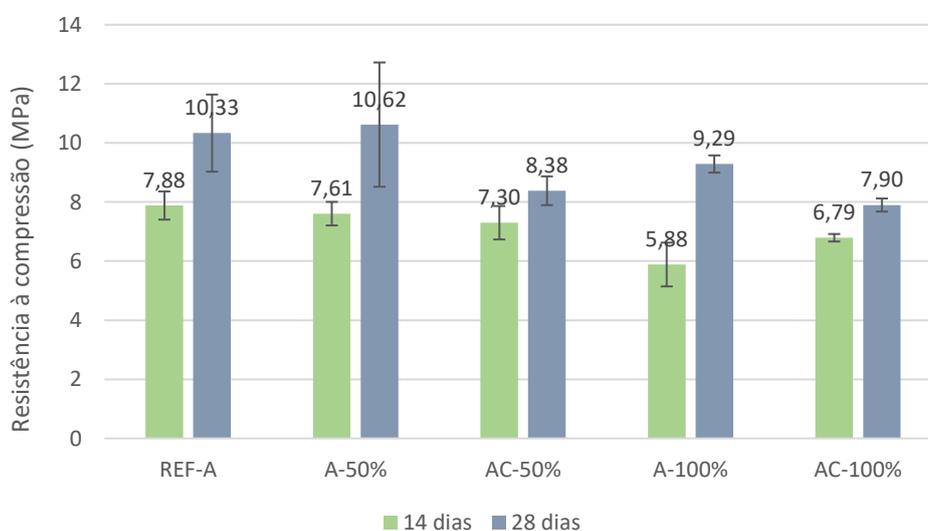


Figura 4. Resistência à compressão das argamassas aos 14 e 28 dias

## 4 CONCLUSÕES

O resíduo A-RCD foi incorporado substituindo a areia em 50% e 100% em argamassas cimentícias. Os resultados obtidos indicam que as argamassas com menor ou maior quantidade de substituição de resíduo apresentam um bom desempenho no comportamento fresco e mecânico, embora se verifique uma diminuição do desempenho mecânico quando a areia é substituída por RCD. No entanto, a argamassa com

100% de resíduo, sem agregado natural, apresenta resistências à flexão e à compressão de cerca de 2,4 MPa e 9,3 MPa, respectivamente, a 28 dias, valores adequados para argamassas não estruturais. Assim, é possível utilizar apenas resíduos de RCD nestas argamassas obtendo resistência mecânica suficiente. Esta reutilização reduz o volume de resíduos enviados para aterro e o volume de recursos naturais explorados para utilização nas argamassas, contribuindo para diversos benefícios ambientais.

Foram também analisadas argamassas com o mesmo agregado reciclado, mas pré-tratados por carbonatação forçada. No entanto, as melhorias no desempenho das argamassas não foram verificadas até à data. Pelo contrário, observou-se uma ligeira tendência de diminuição das características mecânicas. Vários factores poderão estar na origem destes resultados: os resíduos já se encontram parcialmente carbonatados durante o período de armazenamento (dado que se encontravam triturados, ao ar) e a parcela que ainda carbonatou durante a exposição ao CO<sub>2</sub> não ser suficiente para fazer a diferença e melhorar as características; ou o método de carbonatação forçada não ser suficientemente eficiente; ou a carbonatação de RCD ter reduzido a aderência entre a matriz cimentícia e o agregado, afectando negativamente as características mecânicas das argamassas, em vez de as melhorar. Embora se tenha verificado uma diminuição de características nestas idades, é ainda possível que exista uma melhoria das características em idades posteriores. Na análise dos resultados obtidos, deve ter-se em conta que, ao longo da vida útil das estruturas onde os materiais cimentícios foram utilizados e, após demolição, dos respectivos resíduos depositados, ocorre carbonatação desses materiais, que, portanto, absorvem e fixam CO<sub>2</sub> através dessa reacção. É importante estimar este nível de carbonatação e de absorção de CO<sub>2</sub>, durante a vida útil das construções, bem como a carbonatação adicional conferida após demolição e posterior britagem dos RCD até à sua utilização como agregados reciclados. Esta quantificação da absorção total de CO<sub>2</sub> nestes materiais poderá compensar em parte a emissão de CO<sub>2</sub> característica da produção do cimento. A carbonatação forçada para consumo de emissões produzidas na indústria deverá complementar todo o potencial de carbonatação existente. Estes aspectos serão analisados mais aprofundadamente em trabalhos futuros. Os agregados reciclados são capazes de captar CO<sub>2</sub>, para além dos benefícios ambientais da incorporação de resíduos, tornando estas argamassas mais ecológicas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores prestam agradecimento à FCT pelo apoio financeiro no âmbito do projecto de investigação WP10B inserido no c<sup>5</sup>Lab - Sustainable Construction Materials Association - (CoLAB 4/2018-CemLab).

## REFERÊNCIAS

- [1] Directorate-General for Environment (European Commission), “EU Construction & Demolition Waste Management Protocol” no. June, pp. 1–22, 2016, doi: 10.3390/su11133638.
- [2] M. Ramos and G. Martinho, “A construção circular e as alterações climáticas” *Construção Ambient.*, vol. 64, pp. 34–37, 2018.
- [3] CEMBUREAU (2013), “The role of cement in the 2050 low carbon economy. The European Cement Association” .
- [4] 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.

- [5] B. Zhan, C. S. Poon, Q. Liu, S. Kou, and C. Shi, "Experimental study on CO<sub>2</sub> curing for enhancement of recycled aggregate properties" *Constr. Build. Mater.*, vol. 67, pp. 3–7, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.008.
- [6] B. J. Zhan *et al.*, "Carbonation and CO<sub>2</sub> uptake of concrete" *Constr. Build. Mater.*, vol. 67, no. June, pp. 7880–7887, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116743.
- [7] C. Pade and M. Guimaraes, "The CO<sub>2</sub> 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-2, *Methods of test for mortar for masonry - Part 2: bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. 1998.
- [11] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-6, *Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*. 1998.
- [12] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-10, *Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar*. 1999.
- [13] European Committee for Standardization (CEN), EN 14146, *Natural stone tests methods: Determination of the dynamic modulus of elasticity (by measuring the fundamental resonance frequency)*. 2004.
- [14] European Committee for Standardization (CEN), EN 12504-4, *Testing concrete in structures - Parte 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*. 2004.
- [15] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-11, *Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. 1999.
- [16] A. Barbudo, J. Ayuso, A. Lozano, M. Cabrera, and A. López-Uceda, "Recommendations for the management of construction and demolition waste in treatment plants" *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 27, no. 1, pp. 125–132, 2020, doi: 10.1007/s11356-019-05578-0.
- [17] A. Muñoz, N. Torres, and A. Guzmán, "Evaluación de un mortero preparado con agregados reciclados de un concreto mejorado por carbonatación: Una mirada a la construcción sustentable Assessment of a mortar with recycled aggregate from a concrete improved by carbonation: A look to a sustainable" *Rev. Ing. Constr.*, vol. 34, pp. 25–32, 2019, [Online]. Available: [www.ricuc.cl](http://www.ricuc.cl).
- [18] C. Shi, Z. Wu, Z. Cao, T. C. Ling, and J. Zheng, "Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO<sub>2</sub> and pozzolan slurry" *Cem. Concr. Compos.*, vol. 86, pp. 130–138, 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.10.013.