



ARGAMASSAS COM AGREGADOS RECICLADOS SUJEITOS A CARBONATAÇÃO FORÇADA E ACELERADA - AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO

Ricardo Infante Gomes ^{a, b}; Catarina Brazão Farinha ^{a, b}; Cinthia Maia Pederneiras ^{b, c}; David Bastos ^c; Rosário Veiga ^a; Jorge de Brito ^b; Paulina Faria ^d

^a Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. rigomes@lnec.pt; cfarinha@lnec.pt; rveiga@lnec.pt

^b CERIS - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal. jb@civil.ist.utl.pt

^c c5Lab - Sustainable Construction Materials Association, Rua Central Park 6, 2795-242 Linda-a-Velha, Lisboa, Portugal. cpederneiras@c5lab.pt; dbastos@c5lab.pt

^d CERIS, NOVA School of Science and Technology, NOVA University Lisbon, 2829-516, Caparica, Portugal; paulina.faria@fct.unl.pt

RESUMO

As indústrias da construção em geral e da produção de cimento em particular são grandes emissoras de CO₂ e responsáveis por 33% dos resíduos gerados na União Europeia, incluindo os resíduos de construção e demolição (RCD). A gestão e reciclagem adequadas destes materiais são urgentes para promover a sustentabilidade. Uma abordagem promissora é utilizar a carbonatação forçada para capturar CO₂ através de RCD, incorporando-os depois como agregados reciclados (AR) em substituição da areia natural em argamassas. Este artigo tem como objetivo avaliar o impacto da utilização de diferentes AR carbonatados no comportamento mecânico de argamassas cimentícias. Para tal, foram utilizados três AR de diferentes tipos e fontes e com diversos graus de carbonatação natural. Os resultados mostraram que as argamassas com AR misto carbonatado exibiram um aumento nas suas resistências mecânicas. No entanto, apesar de a microestrutura dos agregados ser alterada com a carbonatação, não se obteve melhorias das características mecânicas das argamassas com AR de betão. Globalmente, as resistências obtidas para as argamassas modificadas são adequadas para argamassas de revestimento. Ainda que os resultados de desempenho mecânico sejam inferiores ou semelhantes, as argamassas com agregados carbonatados deverão apresentar uma pegada de carbono menor em comparação com as argamassas com agregados não carbonatados, devido à captura de CO₂.

Palavras-chave: Cimento; Argamassa sustentável não estrutural; Resíduos de construção e demolição; Carbonatação natural; Captura e armazenamento de CO₂



1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a concentração de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera aumentou consideravelmente, com cerca de 40% do total desse aumento atribuído às atividades humanas (Sanjuán *et al.* 2020). A concentração elevada deste gás, em conjunto com outros gases de efeito de estufa, é responsável pelo aquecimento global, uma das principais ameaças ambientais. Desta forma, são necessárias medidas urgentes para a mitigação destas emissões.

A produção de cimento é fundamental para o setor da construção, sendo, no entanto, uma das principais fontes de emissão de CO_2 . Estas emissões ocorrem em todo o processo de produção, desde a extração de matérias-primas até ao transporte, resultando num impacte significativo no meio ambiente. Deste modo, o impacte ambiental desta indústria está a tornar-se uma preocupação cada vez mais premente, tendo em conta também as metas de neutralidade carbónica da União Europeia (Salvia *et al.* 2021). Adicionalmente, cerca de um terço dos resíduos produzidos na Europa são gerados pela construção, nos quais se incluem os resíduos de construção e demolição (RCD) (Directorate-General for Environment 2016). A incorporação destes resíduos como agregados reciclados (AR) em produtos de construção, como argamassas e betões, surge como uma medida de gestão e reciclagem adequada, prolongando o ciclo de vida dos resíduos e reduzindo ainda a exploração de recursos naturais (Infante Gomes *et al.* 2021).

Um estudo sobre o impacte ambiental da produção de cimento em Portugal entre 2005 e 2015 concluiu que, tendo em conta todas as emissões de CO_2 ao longo do ciclo de vida, este cimento absorveu entre 14,8 e 19,6% do CO_2 emitido (Sanjuán *et al.* 2020). Desta forma, é possível recuperar parte do CO_2 emitido na produção do cimento. Assim, uma solução para a captura de CO_2 emitida por parte da indústria cimenteira e para a gestão de RCD poderá ser a captura de CO_2 através de RCD por mecanismos de carbonatação forçada, incorporando-os depois como AR substituindo o agregado natural em argamassas e betões.

O uso de RCD como AR em argamassas e betões tem sido objeto de vários estudos, com resultados promissores. No entanto, estes agregados reduzem, geralmente, o desempenho destes compósitos. Diversos estudos (Chinzorigt *et al.* 2020; Gholizadeh-Vayghan *et al.* 2020; Muñoz *et al.* 2019; Pu *et al.* 2022; Russo e Lollini 2022) afirmam que a incorporação de agregados de RCD submetidos a carbonatação forçada em argamassas e betões melhora as suas características, nomeadamente as propriedades mecânicas, em comparação com a incorporação de agregados não carbonatados, uma vez que contribuem também para a captura e armazenamento de CO_2 (CCS - *carbon capture and storage*). No entanto, a grande maioria dos estudos focados nesta questão utiliza resíduos formulados em laboratório, o que não corresponde à realidade dos RCD disponíveis.

Desta forma, este artigo pretende estudar a incorporação de três tipos de AR distintos, de fontes e com graus de carbonatação natural diferentes (um AR misto, um AR de betão e um agregado de betão formulado em laboratório), sujeitos a carbonatação forçada em argamassas cimentícias, e avaliar o impacte no seu comportamento mecânico consoante o tipo de AR utilizado.

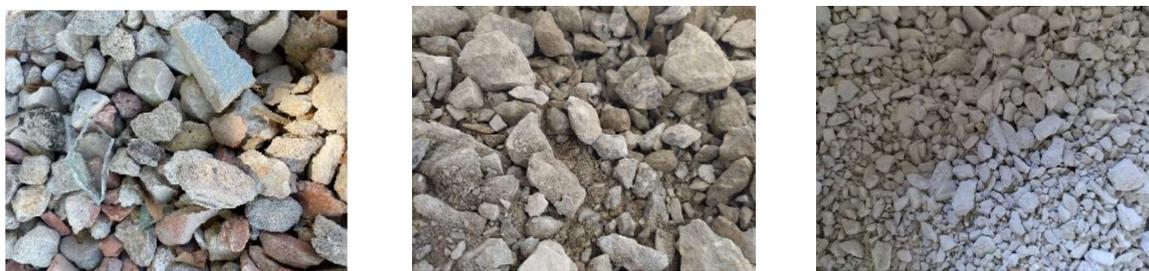
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Para o estudo de argamassas com incorporação de agregados reciclados provenientes de RCD sujeitos a carbonatação forçada, foram selecionados quatro tipos de agregados diferentes: um agregado natural, um AR misto e um AR de betão provenientes de duas Operadoras de Gestão de Resíduos (OGR)



portuguesas, e um agregado de betão formulado em laboratório (CC). O agregado natural (AN) utilizado resulta da mistura de várias areias siliciosas calibradas, contendo mais de 98% de sílica, juntamente com quartzito, quartzo e minerais de feldspato, fornecidos pela Areipor - Areias Portuguesas. O agregado reciclado misto (MRA) - Figura 1a - corresponde a uma mistura de diversos materiais, sendo constituído, em massa, por cerca de 37% de produtos cimentícios, 27% de materiais cerâmicos, 16% de agregados naturais, 7% de materiais betuminosos, 7% de vidro e 7% de outros materiais tais como plástico, gesso e metais. Por sua vez, o agregado reciclado de betão (RCA) - Figura 1b - possui 89% de betão, produtos de betão, argamassas ou blocos de betão de alvenaria, e 11% de agregados naturais não ligados. O agregado de betão (CC) formulado em laboratório resulta da britagem de blocos de betão de classe C30/37 produzidos pela Betão Liz, sendo constituído por 91% de pasta de cimento e 9% de agregado natural (após britagem) - Figura 1c (REF caracterização dos agregados).



(a)

(b)

(c)

Figura 1 - Agregados reciclados: MRA (a), RCA (b), CC (c)

Para a caracterização dos agregados e posterior incorporação em argamassas, os três AR passaram por um processo de pré-secagem até massa constante a 40 °C numa estufa ventilada. Posteriormente, foram triturados e peneirados, utilizando-se as partículas inferiores a 2 mm.

Num estudo realizado por Bastos et al. (2024), verificou-se que o período ideal de exposição ao CO₂, ou seja, o período que conduz à máxima captura, nas condições de 23 °C, 60% de humidade relativa (HR) e 25% de concentração de CO₂, é de 5 horas para o MRA e de 12 horas para os agregados RCA e CC. Neste período ideal, os agregados MRA, RCA e CC capturam cerca de 11%, 5% e 16% de CO₂ por tonelada de pasta de cimento, que corresponde a 0,2%, 1% e 5% de CO₂ por tonelada de RCD, respetivamente. Estes resultados são considerados promissores no que diz respeito à capacidade de captura de CO₂ por parte de agregados reciclados.

Os agregados foram caracterizados em termos da massa volúmica das suas partículas e absorção de água antes e após a carbonatação forçada. Para a caracterização após carbonatação, uma fração dos três AR foi carbonatada numa câmara de CO₂ durante o período ideal de cada agregado nas seguintes condições: 23 °C, 60% de HR e 25% de CO₂, seguindo o procedimento descrito por Bastos et al. (2024). O Quadro 1 apresenta os valores da massa volúmica das partículas e absorção de água para o AN e para os AR não carbonatados e carbonatados; o AN apresentou os valores mais elevados de massa volúmica das partículas e mais baixos de absorção de água. A carbonatação forçada e acelerada dos AR levou a uma redução da sua absorção de água e da sua porosidade e, inversamente, a um aumento da sua massa volúmica. É notória uma melhoria das propriedades dos três AR após a carbonatação, através da redução da sua absorção de água (Quadro 1). A redução da absorção de água dos agregados carbonatados em relação aos não carbonatados foi mais notória para o CC (90%), sendo de aproximadamente 43% e 36% para o MRA e o RCA, respetivamente.

As argamassas foram produzidas com uma relação volumétrica ligante: agregado de 1:4 considerada adequada para argamassas cimentícias de revestimento, com cimento tipo CEM II/B-L 32,5 N como



ligante. Foi utilizada a mesma curva granulométrica - Figura 2 - para todos os agregados estudados de forma a obter argamassas comparáveis.

Quadro 1 - Massa volúmica das partículas e absorção de água do agregado natural e dos agregados reciclados

Agregado	Massa volúmica das partículas (kg/m ³)		Absorção de água (%)	
	Não carbonatado	Carbonatado	Não carbonatado	Carbonatado
AN	2633 ± 4	-	0,25 ± 0,08	-
MRA	2485 ± 52	2570 ± 40	6,89 ± 0,91	3,90 ± 0,88
RCA	2636 ± 57	2694 ± 44	3,81 ± 0,54	2,45 ± 0,13
CC	2622 ± 7	2670 ± 9	4,74 ± 0,16	0,46 ± 0,04

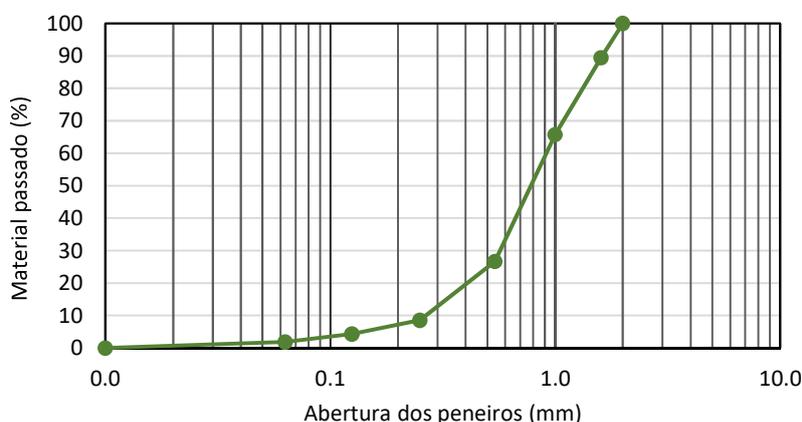


Figura 2 - Curva granulométrica dos agregados utilizados para a formulação das argamassas

Para a amassadura das argamassas, utilizou-se uma misturadora de laboratório, funcionando automaticamente a uma velocidade lenta para homogeneizar o ligante e o agregado no recipiente da misturadora. Durante os 30 segundos iniciais, foi gradualmente adicionada água (definida para atingir uma consistência por espalhamento adequada) ao recipiente com o mesmo movimento da misturadora. Foi efetuada uma pausa na mistura após 2,5 minutos para assegurar que os materiais estavam completamente misturados, raspando as bordas do recipiente. Posteriormente, com o mesmo movimento da misturadora, o processo de mistura foi reiniciado durante mais 30 segundos.

Para avaliar as características das argamassas com incorporação de AR carbonatados, foram formuladas argamassas substituindo o AN por cada AR (MRA, RCA e CC). Esta substituição por AR foi efetuada antes e após serem sujeitos a carbonatação forçada, numa câmara de carbonatação em condições de 23 °C, 60% de HR e 25% de CO₂ por 5 horas (MRA) e 12 horas (RCA e CC), em taxas de substituição de 50% e 100%, em volume. Adicionalmente, foi produzida uma argamassa apenas com AN, designada por argamassa de referência (REF).

Após a amassadura, provetes das 13 argamassas foram moldados em moldes metálicos com dimensões normalizadas (40 mm x 40 mm x 160 mm), produzindo seis provetes por argamassa. Estes foram mantidos em condições controladas a 20 ± 2 °C e 95 ± 5% de HR durante os primeiros dois dias, após os quais foram desmoldados e mantidos durante mais 5 dias nas mesmas condições. Os provetes foram então armazenados numa sala controlada com a mesma temperatura e uma HR de 65 ± 5%.



2.2 MÉTODOS

As argamassas produzidas foram caracterizadas em termos do seu estado fresco e comportamento mecânico, como observado no Quadro 2.

Quadro 2 - Ensaios realizados para a caracterização das argamassas

Ensaio	Idades analisadas (dias)	Norma
Consistência por espalhamento	Estado fresco	EN 1015-3 (1999)
Massa volúmica fresca	Estado fresco	EN 1015-6 (1998)
Massa volúmica aparente	28, 90	EN 1015-10 (1999)
Módulo de elasticidade dinâmico (MED) por frequência de ressonância	28, 90	EN 14146 (2004)
Resistência à flexão	28, 90	EN 1015-11 (2019)
Resistência à compressão	28, 90	EN 1015-11 (2019)

A trabalhabilidade das argamassas foi avaliada com base na sua consistência por espalhamento. A argamassa fresca foi colocada num molde troncocónico em duas camadas, ajustadas ao molde com inserção de uma vareta. Após a remoção do molde, foram aplicados 15 golpes na mesa de espalhamento em 15 segundos. Seguidamente, o espalhamento da argamassa em duas direções perpendiculares foi medido, sendo a média dessas medidas o resultado de cada ensaio. A massa volúmica no estado fresco das argamassas foi avaliada através da sua compactação num recipiente cilíndrico de volume e massa conhecidos. Depois de retirado o excesso de argamassa, pesou-se todo o conjunto para determinar a massa volúmica da argamassa.

A determinação da massa volúmica aparente das argamassas endurecidas foi realizada através da medição das dimensões dos provetes prismáticos, determinando assim o seu volume, e da sua massa. Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico (MDE), foi utilizado o método de frequência de ressonância, utilizando três provetes prismáticos sujeitos a vibrações induzidas pelo equipamento (ZRM ZEUS 2005). A resistência à flexão das argamassas foi avaliada utilizando uma máquina universal (ETI-HM-S/CPC da PROETI, S.A.) com um dispositivo de flexão de três pontos e uma célula de carga de 2 kN. A força máxima aplicada durante o ensaio foi registada e a resistência à flexão foi determinada utilizando a equação da norma. Metade de cada provete ensaiado foi então utilizada para o ensaio de resistência à compressão, utilizando uma célula de carga de 200 kN e o mesmo equipamento. A força de compressão máxima antes da rotura foi registada para calcular a resistência à compressão, pelo quociente com a área de compressão.

3 RESULTADOS

3.1 ESTADO FRESCO

Para as argamassas de revestimento, a razão água/cimento (a/c) é determinada com vista a uma trabalhabilidade adequada. No caso das argamassas formuladas, essa relação foi estabelecida experimentalmente, com um valor de espalhamento de 160 ± 10 mm. Os resultados das propriedades das argamassas no estado fresco encontram-se no Quadro 3 para a REF e para as argamassas formuladas com MRA, RCA e CC, não carbonatados e carbonatados. A incorporação de AR nas argamassas provocou um ligeiro aumento da razão a/c comparativamente à argamassa de referência.



Tal significa que a incorporação de AR de um modo geral aumentou a quantidade de água necessária para obter a consistência requerida.

Quadro 3 - Resultados dos ensaios realizados das argamassas em estado fresco

Argamassa	Razão a/c	Consistência por espalhamento (mm)	Massa volúmica (kg/m ³)
REF	1,0	162 ± 1	2060 ± 14
MRA50	1,1	163 ± 2	1908 ± 18
MRA50C	1,1	161 ± 1	1916 ± 4
MRA100	1,2	164 ± 1	1901 ± 5
MRA100C	1,2	162 ± 1	1911 ± 10
RCA50	1,2	163 ± 2	1908 ± 18
RCA50C	1,1	161 ± 1	1916 ± 4
RCA100	1,2	164 ± 1	1901 ± 5
RCA100C	1,2	162 ± 1	1911 ± 10
CC50	1,1	169 ± 1	2008 ± 4
CC50C	1,0	163 ± 3	2008 ± 6
CC100	1,2	163 ± 2	1851 ± 1
CC100C	1,1	163 ± 3	1903 ± 10

No entanto, a carbonatação teve um efeito positivo ao reduzir a absorção de água dos AR e aumentar a massa volúmica das partículas, o que implica uma redução da razão a/c.

A argamassa de referência, produzida apenas com AN, apresentou uma massa volúmica de 2060 ± 14 kg/m³, superior à das restantes argamassas. Através do Quadro 3, observa-se ainda que, quanto maior a substituição de AN por AR, menor é a massa volúmica das argamassas, devido principalmente à massa volúmica das partículas, que é superior para o AN em relação aos AR (Quadro 1). No entanto, as argamassas com AR carbonatados não sofreram alterações significativas na sua massa volúmica quando comparadas com as argamassas com agregados não carbonatados.

3.2 ESTADO ENDURECIDO

3.2.1 Massa volúmica aparente

Os resultados obtidos para a massa volúmica aparente das argamassas, a 28 e 90 dias de ensaio, encontram-se representados na Figura 3. Verificou-se uma redução da massa volúmica aparente das argamassas à medida que aumenta a taxa de incorporação de AR. Esta diminuição poderá ser provavelmente atribuída à maior porosidade e menor massa volúmica dos AR em relação ao AN. Não se registaram diferenças significativas na massa volúmica aparente das argamassas com AR carbonatados em comparação com as argamassas com AR não carbonatados.

3.2.2 Módulo de elasticidade dinâmico

Na Figura 4, estão representados os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas. Como se pode verificar, a argamassa REF apresentou o valor mais elevado de MED, enquanto para as argamassas com AR provenientes de OGR (MRA e RCA) o MED diminuiu com o aumento do seu grau de incorporação.



Apesar da diminuição geral do MED com a incorporação de AR carbonatados, a 28 dias a argamassa RCA50C apresentou um aumento de 12%, enquanto a argamassa MRA50C apresentou a 90 dias um aumento de cerca de 15% no seu MED relativamente às respetivas argamassas com AR não carbonatados.

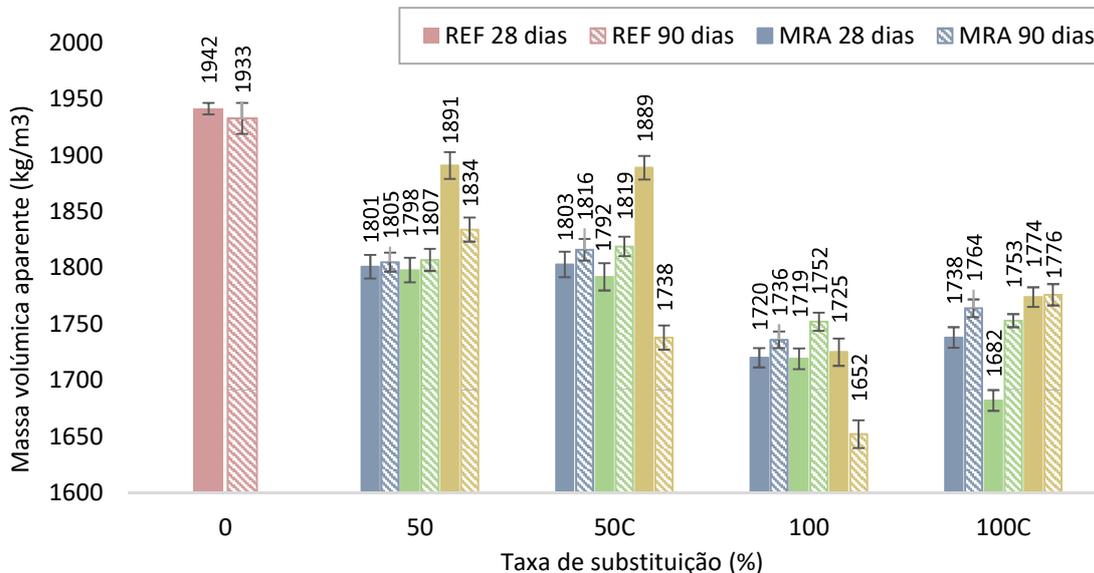


Figura 3 - Massa volúmica aparente das argamassas estudadas a 28 e 90 dias

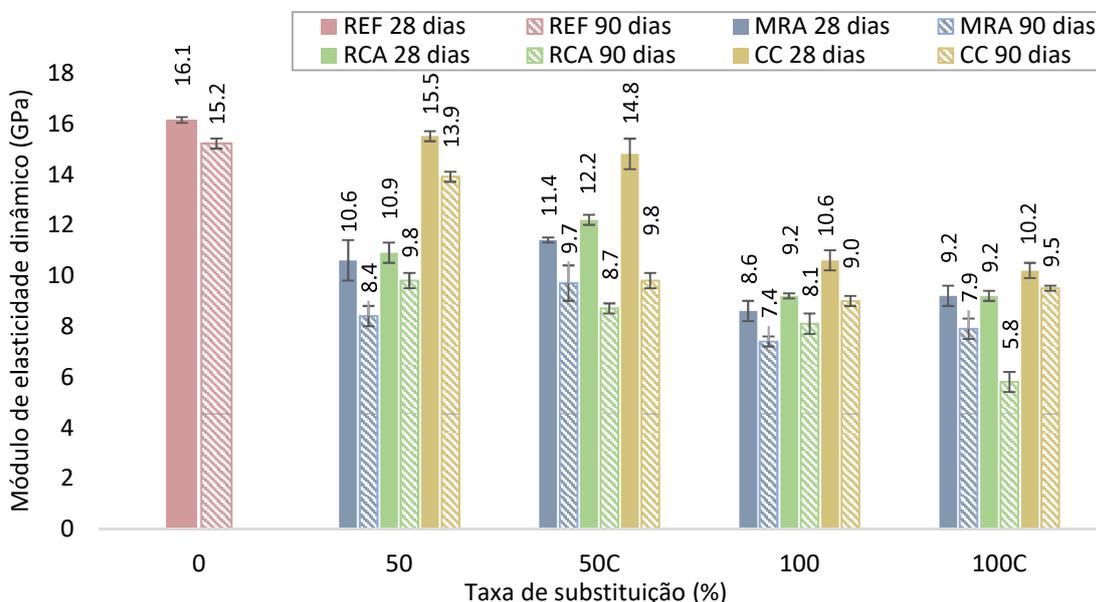


Figura 4 - Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas estudadas a 28 e 90 dias

Com base nos resultados do MED obtidos para as argamassas que contêm AR carbonatados, verificou-se uma clara tendência de diminuição dos valores em comparação com as argamassas com AR não carbonatados. Este decréscimo poderá dever-se à maior microporosidade dos AR carbonatados provocada pela descalcificação do C-S-H, como resultado da carbonatação forçada, resultando em decréscimos de porosidade e MED. Este efeito é mais notório para as argamassas com RCA e CC que possuem teores de materiais passíveis de serem carbonatados superiores aos das argamassas com MRA.



3.2.3 Resistência à flexão e à compressão

As argamassas formuladas com AR apresentaram uma diminuição das suas resistências mecânicas, comparativamente à argamassa de referência (Figura 5 e Figura 6). Relativamente às argamassas formuladas com AR não carbonatados, as argamassas com CC apresentaram resistências superiores às de MRA e RCA. Tal deve-se à constituição dos AR, uma vez que o agregado CC possui um maior teor de pasta de cimento e pedra natural, agregados não ligados e ligados hidraulicamente.

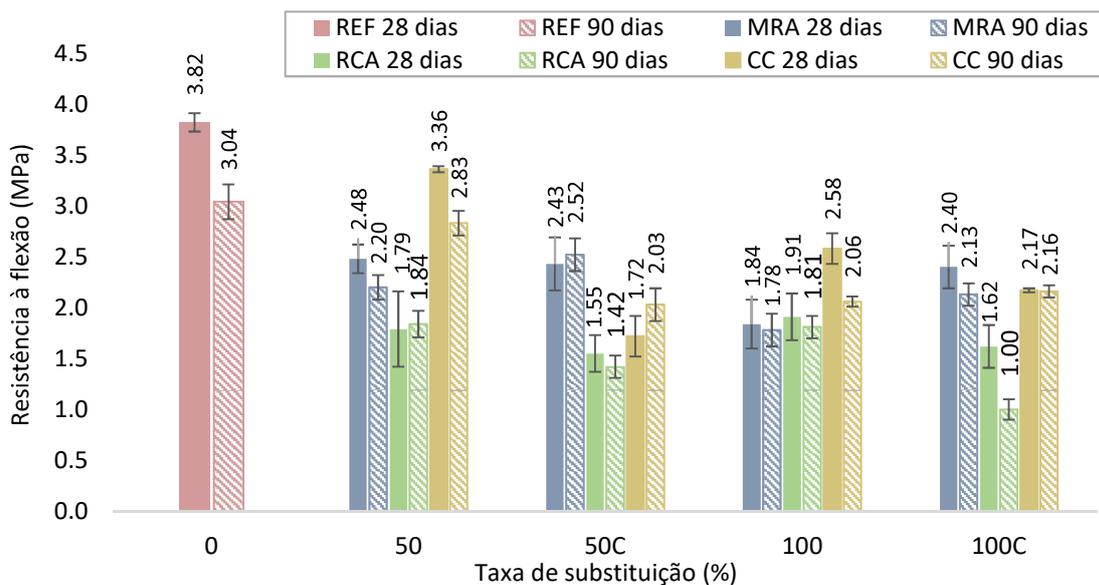


Figura 5 - Resistência à flexão das argamassas estudadas a 28 e 90 dias

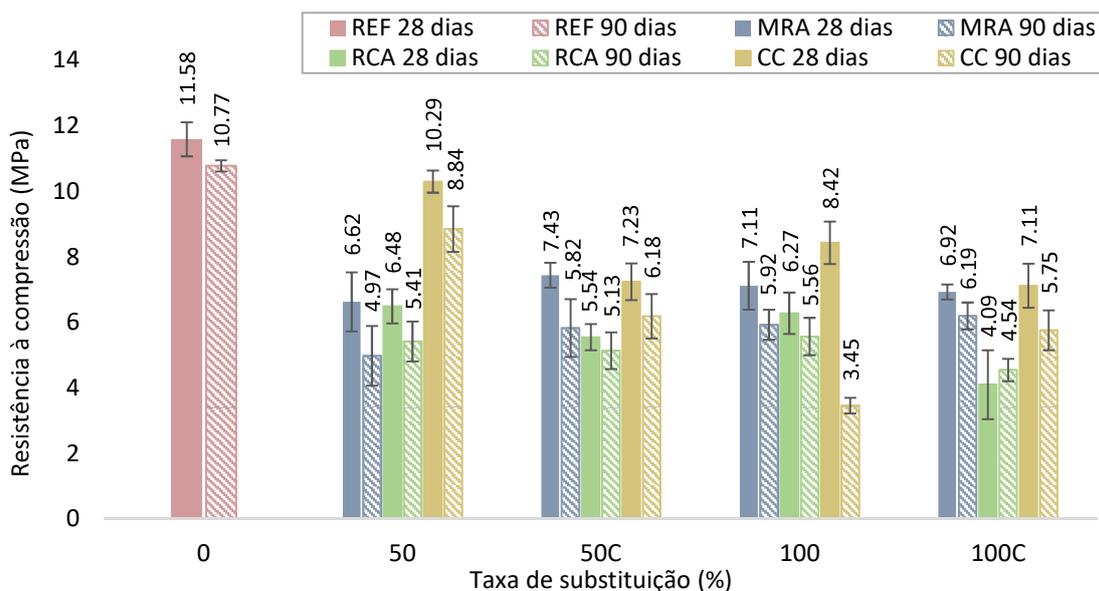


Figura 6 - Resistência à compressão das argamassas estudadas a 28 e 90 dias

Comparando as argamassas com AR não carbonatados e AR carbonatados, observam-se algumas diferenças na resistência à flexão. A 28 dias, a argamassa MRA100C apresentou uma resistência à flexão 30% superior à correspondente argamassa com agregados não carbonatados (MRA100). A argamassa MRA50C apresentou uma resistência à flexão muito semelhante à da argamassa com 50%



de MRA não carbonatado. Quando ensaiadas a 90 dias, observaram-se aumentos de 15% e 20% na resistência à flexão das argamassas MRA50C e MRA100C, respetivamente, em relação às argamassas MRA50 e MRA100. Assim, as argamassas com 50% e 100% de MRA carbonatado apresentaram, em geral, ligeiras melhorias na resistência à flexão em relação às não carbonatadas, enquanto a incorporação de RCA e CC carbonatados não produziu melhorias na sua resistência à flexão em relação às argamassas com RCA e CC não carbonatados.

Tal como na resistência à flexão, apenas se verificaram melhorias da resistência à compressão das argamassas com MRA carbonatado. A 28 dias, a argamassa MRA50C apresentou uma resistência à compressão 12% superior à argamassa MRA50, enquanto a argamassa MRA100C não mostrou alterações comparativamente a MRA100. A 90 dias, a tendência é similar, ou seja, a argamassa MRA50C apresentou uma resistência à compressão 17% superior à da argamassa MRA50. À semelhança da resistência à flexão, geralmente verificaram-se reduções da resistência à compressão das argamassas de 28 para 90 dias, que se poderá dever a fenómenos de microfissuração interna.

Como resultado da alteração na microestrutura dos AR devida à carbonatação, é expectável um aumento do número de microporos e uma redução significativa dos poros capilares (Haga *et al.* 2005, Sereng *et al.* 2021). Este aumento da microporosidade dos AR deve-se aos efeitos de descalcificação dos C-S-H decorrente da carbonatação (Houst, 1997). Ainda, segundo Swenson e Sereda (1968), a carbonatação pode contribuir para a retração da pasta de cimento através da polimerização e desidratação dos C-S-H, originando microfissuras em pontos fracos da matriz cimentícia. Estas microfissuras podem desenvolver-se na zona de transição interfacial entre a antiga matriz de cimento e os antigos agregados presentes nos AR (Liang *et al.* 2020). Desta forma, o aumento dos microporos dos AR e a possível retração resultantes da carbonatação podem originar a perda global das resistências mecânicas das argamassas nas quais são incorporados os AR carbonatados (Segura *et al.* 2013). Assim, quanto maior for o teor de Portlandite (Ca(OH)_2) e C-S-H, maior será o aumento de porosidade dos AR carbonatados e conseqüente perda da resistência mecânica das argamassas nas quais estes são incorporados. Tal verifica-se pelos resultados obtidos, uma vez que as argamassas CC50C e CC100C foram as que apresentaram maiores reduções comparativamente às respetivas argamassas com CC não carbonatado. A tendência inversa verificou-se para as argamassas com o MRA carbonatado, que apresentaram resistências idênticas ou superiores (MRA50C) às argamassas com MRA não carbonatado. Tal pode dever-se a possuírem menores teores de fração cimentícia passível de carbonatar, logo os efeitos negativos da carbonatação serem menos significativos.

A resistência à compressão de argamassas (aos 28 dias) de rebocos pode ser classificada de acordo com a norma EN 998-1 (2016) em diversas classes de resistência. Comparando as classes de resistência à compressão das argamassas, todas as argamassas com AR não carbonatados estão na mesma classe do que a REF (CS IV). Apenas as argamassas com RCA carbonatado têm uma classe inferior (CS III) à das correspondentes argamassas com RCA não carbonatados, tendo as restantes argamassas com AR carbonatados (MRA e CC) a mesma classe (CS IV) que a REF e as argamassas contendo AR não carbonatados. De acordo com os requisitos da mesma norma, para uma utilização de argamassas para uso geral como rebocos exteriores e interiores, as argamassas estudadas são classificadas nas classes superiores da norma. Assim, as argamassas contendo AR não carbonatados e carbonatados cumprem os requisitos em termos de resistência à compressão.

4 CONCLUSÕES

Três agregados reciclados (AR) - um misto (MRA), um de betão obtido em obra (RCA) e um de betão produzido em laboratório (CC) - foram moídos e peneirados, tendo sido incorporados tal qual (não



carbonatados) e depois de carbonatados a 23 °C, 60% HR e 25% de CO₂, em argamassas cimentícias como substituto parcial (50%) ou total (100%) do agregado natural (AN). Avaliou-se o efeito da substituição do AN por estes AR, carbonatados e não carbonatados, no comportamento das argamassas.

A incorporação de AR nas argamassas apresentou uma tendência ligeira de aumento da relação a/c, principalmente quando não carbonatado, e levou a uma redução da sua massa volúmica aparente, devendo-se, provavelmente, à microestrutura mais porosa do AR e à sua menor massa volúmica em relação ao AN. Para além disso, não foram observadas variações significativas na massa volúmica aparente entre argamassas com AR não carbonatados e carbonatados.

O módulo de elasticidade dinâmico foi superior para a argamassa de referência, diminuindo com o aumento da incorporação de AR. Em geral, os AR carbonatados reduziram o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas em relação ao AR não carbonatados. A incorporação de RCA e CC carbonatados nas argamassas conduziu a menores resistências mecânicas, em comparação com as argamassas com RCA e CC não carbonatados. No entanto, as argamassas com MRA carbonatado apresentaram resistências mecânicas superiores às argamassas com MRA não carbonatado. A diminuição de resistências verificada para as argamassas com RCA e CC carbonatados face às argamassas com RCA e CC não carbonatados foi, possivelmente, devida ao aumento da microporosidade dos AR induzido pela carbonatação e fenómenos de microfissuração, que é tanto maior quanto maior for o teor de Portlandite e C-S-H disponíveis para carbonatação, como se verificou para as argamassas com CC carbonatado.

No entanto, as resistências das argamassas modificadas são adequadas para argamassas de revestimento. Adicionalmente deve notar-se que, embora os resultados do desempenho mecânico sejam inferiores ou semelhantes, as argamassas com agregados carbonatados deverão apresentar uma menor pegada de CO₂ quando comparadas com as argamassas com agregados não carbonatados devido à captura de CO₂ por parte dos agregados reciclados e à redução de materiais virgens, devendo este aspeto ser quantificado em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- Bastos, D., Brazão Farinha, C., Maia Pederneiras, C., Veiga, R., Bogas, J.A., Infante Gomes, R., Santos Silva, A. (2024). Pathway to carbon neutrality in the cement industry: CO₂ uptake by recycled aggregates from construction and demolition waste. *Applied Sciences*, 14:5224. <https://doi.org/10.3390/app14125224>
- EN 998-1 (2016), Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar. CEN, Brussels.
- EN 1015-3 (1999), Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). CEN, Brussels.
- EN 1015-6 (1998), Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar. CEN, Brussels.
- EN 1015-10 (1999), Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar. CEN, Brussels.
- EN 1015-11 (2019), Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. CEN, Brussels.
- EN 14146 (2004), Natural stone test methods. Determination of the dynamic elastic modulus of elasticity (by measuring the fundamental resonance frequency). CEN, Brussels.



- Chinzorigt, G., Lim, M. K., Yu, M., Lee, H., Enkbold, O., Choi, D. (2020). Strength, shrinkage and creep and durability aspects of concrete including CO₂ treated recycled fine aggregate. *Cement and Concrete Research* 136:106062. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106062>
- European Commission Directorate-General for Internal market, Industry, Entrepreneurship and SMEs(2016). EU Construction & Demolition Waste Management Protocol. September:1–49. file:///C:/Users/Paulina%20Faria/Downloads/Protocol%20Ares(2016)5840668-101016.pdf
- Gholizadeh-Vayghan, A., Bellinkx, A., Snellings, R., Vandoren, B., Quaghebeur, M. (2020). The effects of carbonation conditions on the physical and microstructural properties of recycled concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 257:119486. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119486>
- Haga, K., Shibata, M., Hironaga, M., Tanaka, S., Nagasaki, S. (2005). Change in pore structure and composition of hardened cement paste during the process of dissolution. *Cement and Concrete Research*, 35(5):943–950. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.001>
- Houst, Y. F. 1997. Carbonation shrinkage of hydrated cement paste. Proceedings 4th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete. CANMET, Ottawa, Canada.
- Infante Gomes, R., Brazão Farinha, C., Veiga, R., de Brito, J., Faria, P., Bastos, D. (2021). CO₂ sequestration by construction and demolition waste aggregates and effect on mortars and concrete performance - An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152:111668. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111668>
- Liang, C., Pan, B., Ma, Z., He, Z., Duan, Z. (2020). Utilization of CO₂ curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 105:103446. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103446>
- Muñoz, A., Torres, N., Guzmán, A. (2019). Evaluación de un mortero preparado con agregados reciclados de un concreto mejorado por carbonatación. *Revista Ingeniería de Construcción*, 34(1):25–32. ISSN 0718-5073
- Pu, Y., Li L., Shi, X., Wang, Q., Abomohra, A. (2022). Improving recycled concrete aggregates using flue gas based on multicyclic accelerated carbonation: Performance and mechanism. *Construction and Building Materials*, 361:129623. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129623>
- Russo N., Lollini, F. (2022). Effect of carbonated recycled coarse aggregates on the mechanical and durability properties of concrete. *Journal of Building Engineering*, 51:104290. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104290>
- Salvia M., et al., (2021). Will climate mitigation ambitions lead to carbon neutrality? An analysis of the local-level plans of 327 cities in the EU. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135:110253, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110253>
- Sanjuán, M. Á., Andrade C., Mora, P., Zaragoza, A. (2020) Carbon dioxide uptake by mortars and concretes made with Portuguese cements. *Applied Sciences*, 10(2):646. <https://doi.org/10.3390/app10020646>
- Segura, I., Molero, M., Aparicio, S., Anaya, J. J., Moragues, A. (2013). Decalcification of cement mortars: Characterisation and modelling. *Cement and Concrete Composites*, 35(1):136-150. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.015>
- Sereng, M., Djerbi, A., Metalssi, O. O., Dangla, P., Torrenti, J. M. (2021). Improvement of recycled aggregates properties by means of CO₂ uptake. *Applied Sciences*, 11(14):6571.

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS

CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024

6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal



<https://doi:10.3390/app11146571>

Swenson, E. G., Sereda, P. J. (1968). Mechanism of the carbonation shrinkage of lime and hydrated cement. *Journal of Applied Chemistry*, 18(4):111-117. <https://doi: 10.1002/jctb.5010180404>