

ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM AGREGADOS RECICLADOS DE RCD SUJEITOS A CARBONATAÇÃO FORÇADA: INFLUÊNCIA DO SUPORTE NA ADERÊNCIA

R. Infante Gomes ^{1,2}, R. Veiga ¹, J. de Brito ², P. Faria ³

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil | Portugal

² CERIS - Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa | Portugal

³ CERIS - Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade NOVA de Lisboa | Portugal

Autor correspondente: rigomes@Inec.pt

Palavras-chave

Reboco; Reciclagem de agregados; Resíduo de Construção e Demolição; Carbonatação acelerada; Captura e armazenamento de carbono; Aderência ao suporte

Resumo

O setor da construção, responsável por cerca de um terço dos resíduos gerados na União Europeia, enfrenta desafios significativos no tratamento destes, sendo crucial promover a sua gestão e reciclagem adequadas. Paralelamente, a indústria cimenteira é responsável por 7% das emissões globais de CO₂ para a atmosfera, tendo o objetivo de atingir a neutralidade carbónica em 2050. Uma solução promissora para estas questões é a captura de CO₂ através de resíduos de construção e demolição (RCD) por mecanismos de carbonatação forçada, incorporando-os como agregados reciclados em substituição de areia e brita natural em argamassas e betões. Desta forma, é prolongado o ciclo de vida destes resíduos, reduzindo ao mesmo tempo a utilização de recursos naturais, enquanto se captura parte das emissões de CO₂ produzidas pela indústria cimenteira. Este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de argamassas cimentícias de revestimento com incorporação de agregados reciclados de RCD, sujeitos a carbonatação forçada, em substituição parcial ou total do agregado natural, aplicadas em diferentes suportes. Para tal, foram produzidas argamassas com um traço volumétrico de 1:4 (cimento: agregado), incorporando agregado natural e um agregado reciclado misto em taxas de substituição de 50% e 100% (em volume) não carbonatado e sujeito a carbonatação forçada (25% CO₂, 60% HR e 23 °C) durante 5 horas. A avaliação do desempenho destas argamassas foi realizada através de aplicações em suporte de tijolo furado cerâmico, o mesmo tijolo com uma camada de chapisco e em bloco de betão de agregados correntes. Avaliou-se o módulo de elasticidade por ultrassons, aderência ao suporte e porosidade. Quando aplicadas em bloco de betão, as argamassas com RCD apresentaram boa aderência, contrariamente ao que se verificou quando aplicadas em tijolo cerâmico. Adicionalmente, as argamassas com agregados reciclados carbonatados aplicadas em bloco de betão apresentaram uma aderência superior à das argamassas com agregados reciclados não carbonatados.

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção é um grande emissor de CO₂ e consome cerca de 48% da energia global anual, além de gerar um terço dos resíduos na União Europeia. A indústria cimenteira, em particular, é uma das mais poluentes, emitindo cerca de 500 kg de CO₂ por tonelada de clínquer produzida [1]. Para mitigar esses impactos, a União Europeia implementa estratégias e medidas legais, visando reduzir as emissões de CO₂ e promover a economia circular dos resíduos de construção e demolição (RCD). Uma solução promissora é a captura de CO₂ por esses resíduos, incorporando-os em materiais de construção, aumentando a sustentabilidade e reduzindo a extração de recursos naturais.

Os RCD são compostos por uma variedade de materiais, como betão, tijolos, telhas, madeira, vidro, plástico e metais. Esses materiais podem ser classificados em seis categorias principais segundo a norma EN 933-11 [2]: Rc (betão e produtos de betão), Ru (agregados não ligados e pedra natural), Rb (elementos cerâmicos), Ra (materiais betuminosos), Rg (vidro) e X (outros materiais). A fração Rc dos RCD possui materiais de matriz cimentícia capaz de sofrer carbonatação, reação química que ocorre quando o CO₂ se difunde através dos poros da matriz e reage com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) e o silicato de cálcio hidratado (CSH), formando carbonato de cálcio (CaCO₃). Desta forma, é possível capturar CO₂ através destes materiais [3]. Os agregados reciclados (AR) de RCD dividem-se em agregados de betão reciclado (RCA), agregados de alvenaria reciclados (RMA) e agregados reciclados mistos (MRA), sendo estes últimos os que ocorrem em maior quantidade.

As argamassas de revestimento, compostas por pelo menos um ligante, agregados e água (podendo ainda conter aditivos), são aplicadas em uma ou várias camadas, constituindo sistemas designados por rebocos, para proteger o suporte e regularizar a respetiva superfície, evitando a sua degradação profunda e contribuindo para a estática. Dos problemas mais comuns em rebocos destaca-se a

fissuração que pode surgir devido à retração das argamassas após a aplicação, realçando a importância da aderência entre a argamassa e o suporte para distribuir as tensões e evitar fissuras [4] [5].

Desta forma, para garantir um bom desempenho do reboco, é essencial considerar a compatibilidade com o suporte em termos geométricos, físicos, mecânicos e químicos. Isso implica que o reboco deve ser capaz de acompanhar as deformações do suporte, ser algo permeável à água e principalmente ao vapor de água, e não conter substâncias que possam causar danos ao suporte. A aderência entre o reboco e o suporte, tal como referido antes, também desempenha um papel crucial, pois a falta desta pode levar a problemas como fissuração, aumento da absorção de água e destacamento do reboco [6] [7].

Este artigo tem como objetivo a avaliação do desempenho de argamassas cimentícias de revestimento com incorporação de agregados reciclados de RCD, sujeitos a carbonatação forçada, em substituição parcial ou total do agregado natural, aplicadas em diferentes suportes, de forma a estudar a compatibilidade entre estas argamassas e o suporte.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. MATERIAIS E ARGAMASSAS

Para o estudo da aderência de argamassas cimentícias de revestimento com AR foram utilizados dois tipos: um agregado natural (AN), uma combinação de areias siliciosas calibradas, compostas por mais de 98% de sílica, com quartzito, quartzo e minerais de feldspato, fornecido pela Areipor - Areias Portuguesas; um AR de RCD proveniente de uma estação de tratamento e reciclagem de resíduos portuguesa. O AR utilizado foi um RCD misto (MRA) uma vez que possui diversos materiais na sua composição, sendo maioritariamente composto, em massa, por 37% de betão e produtos de betão e argamassas, e 27% por materiais cerâmicos, como ilustrado na Figura 1. Tratando-se de uma mistura de materiais com dimensões superiores a 2 mm (dimensão superior dos agregados utilizados em argamassas), o MRA passou por um processo de pré-secagem até massa constante a 40 °C numa estufa ventilada, tendo sido posteriormente britado e peneirado, utilizando-se as partículas inferiores a 2 mm. Como ligante foi utilizado cimento Portland tipo CEM II/B-L 32,5 N, da CIMPOR. O traço volumétrico utilizado foi de 1:4 (ligante: agregado), bastante comum para argamassas de revestimento de cimento.

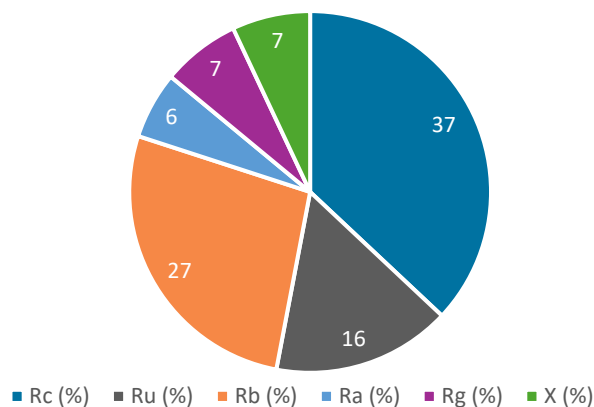


Figura 1. Constituintes presentes no agregado reciclado MRA

De forma a avaliar o desempenho das argamassas, foram definidas cinco formulações diferentes: argamassa de referência com 100% de AN (REF); argamassas com 50% e 100% de substituição do AN por MRA não carbonatado (MRA50 e MRA100, respetivamente); e argamassas com 50% e 100% de substituição do AN por MRA carbonatado (MRA50C e MRA100C, respetivamente). Como referido, o AR MRA foi utilizado sem qualquer modificação para além da britagem e peneiração (não carbonatado), e sujeito a carbonatação forçada e acelerada numa câmara de carbonatação sob condições controladas de temperatura (23 °C), humidade relativa (60%) e concentração de CO₂ (25%), durante um período de 5 horas, período este em que, comparativamente a outros, se verificou que a captura de CO₂ era maximizada [8].

O AR apresenta uma distribuição granulométrica, após britagem e, adequada para a formulação de argamassas, facilitando a sua aplicação direta na indústria – Figura 2. Para garantir a comparabilidade entre as argamassas, a curva granulométrica do AN foi ajustada à do AR.

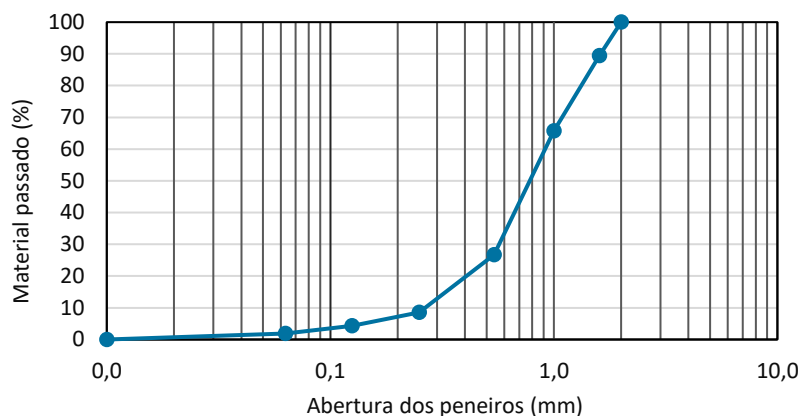


Figura 2. Curva granulométrica dos agregados utilizados para a formulação das argamassas

Com vista ao estudo da influência do suporte na aderência de argamassas com AR carbonatados, foram selecionados três suportes distintos: tijolo cerâmico furado, tijolo cerâmico furado com camada de chapisco e bloco de betão de agregados correntes - Figura 3. O chapisco foi constituído por uma argamassa de cimento (mesmo cimento e AN utilizado para as restantes argamassas) com uma razão água/cimento (a/c) de 1,2 aplicado com talocha.



Figura 3. Suportes utilizados para o estudo da aderência: tijolo cerâmico, tijolo cerâmico com chapisco e bloco de betão

Para preparar as argamassas, cada componente foi pesado numa balança com precisão de 0,1 g. As amassaduras das argamassas foram realizadas numa misturadora de laboratório, previamente humedecida: durante os primeiros 30 segundos, foi vertida a água para o recipiente; após 2,5 minutos, a misturadora foi parada e as paredes do recipiente foram raspadas, de modo que todo o material entrasse na mistura; por fim a misturada foi iniciada novamente, à mesma velocidade, durante mais 30 segundos. As argamassas foram aplicadas sobre as unidades de alvenaria selecionadas como suporte seguindo várias etapas. Primeiro, duas régua de madeira com altura de 2 cm foram posicionadas na parte superior do suporte, servindo como cofragem. Em seguida, o suporte foi humedecido com água para evitar a rápida absorção da água de amassadura das argamassas pelo suporte, simulando uma aplicação próxima à real. Finalmente, a argamassa foi aplicada com uma talocha, exercendo uma certa pressão para garantir um bom grau de compactação, e a superfície foi então nivelada.

2.2. MÉTODOS DE ENSAIO

Para avaliar o desempenho das argamassas aplicadas sobre os diversos suportes, foram realizados os ensaios indicados na Tabela 1, seguindo as normas ou especificações de ensaio aplicáveis.

O ensaio que determina o módulo de elasticidade através da propagação de ultrassons avalia a compacidade e rigidez das argamassas. Este ensaio, realizado através do método indireto (ambos os transdutores posicionados na mesma superfície da superfície das argamassas, variando a distância entre eles) baseia-se num impulso de vibrações longitudinais gerado por um transdutor eletroacústico colocado sobre a superfície da argamassa aplicada no suporte. Este impulso percorre um determinado comprimento até chegar a um segundo transdutor, onde é convertido num sinal elétrico. Desta forma, mede-se o tempo que o impulso demora a percorrer o trajeto entre os dois transdutores. Assim, o módulo de elasticidade da argamassa pode ser calculado através da equação 1, onde K é obtido da equação 2, ν é o coeficiente de Poisson, V é a velocidade de propagação dos ultrassons, e ρ é a massa volúmica aparente da argamassa.

Tabela 1. Ensaio de avaliação das argamassas aplicadas nos diversos suportes

Ensaio	Norma
Módulo de elasticidade por velocidade de propagação de ultrassons	EN 12504-4 [9]
Suscetibilidade à fissuração	-
Aderência ao suporte	EN 1015-12 [10]
Porosidade aberta	EN 1936 [11]

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

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

O ensaio para avaliar a suscetibilidade à fissuração das argamassas aplicadas nos suportes baseia-se na observação visual sistemática ao longo do tempo, desde a aplicação até idades mais avançadas, para verificar o aparecimento de fissuras na superfície e eventual descolagem do suporte.

Relativamente ao ensaio de aderência ao suporte, este envolve a aplicação de uma força de tração perpendicular sobre a superfície de amostras da argamassa utilizando placas que lhe são fixadas. As amostras são obtidas por corte da camada de argamassa até ao suporte, em zonas previamente definidas, por forma a captar a interface argamassa/suporte. Esta força é aplicada por meio de um dinamómetro modelo CONTROLS C 215/D, que mede de 0 a 5 kN com uma precisão de 50 N, e opera a uma taxa de 0,003 a 0,100 N/(mm².s). As amostras são então arrancadas, registrando-se o valor da carga de rotura. A tensão de aderência é determinada dividindo-se a força pela área das placas de tração, aderidas às amostras por colagem. No ensaio, podem ocorrer três tipos válidos de rotura: adesiva, coesiva na argamassa, e coesiva no suporte.

O ensaio de porosidade aberta é realizado com amostras provenientes do ensaio de aderência ao suporte, 28 dias após a aplicação da argamassa, para quantificar o volume de poros interligados. Três amostras de cada tipo de argamassa foram secas em estufa ventilada a 40 ± 5 °C e, em seguida, colocadas num exsiccador a vácuo a uma pressão de 400 mbar. Após 24 horas, foi água adicionada lentamente ao exsiccador, mantendo a pressão interna, até submergir todas as amostras com uma camada de 1 cm de água acima delas. As amostras permaneceram submersas sob pressão por mais 24 horas. Após esse período, a bomba de vácuo foi desligada e as amostras permaneceram no exsiccador por mais 1 hora. Posteriormente, foram medidas a massa hidrostática e a massa saturada com a superfície seca. A porosidade aberta foi calculada pela relação entre a diferença da massa saturada e a massa seca, e a diferença da massa saturada e a massa hidrostática.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade, determinado pela velocidade de propagação de ultrassons das argamassas aplicadas nos suportes, é apresentado na Tabela 2.

Em geral, as argamassas com AR apresentam módulo de elasticidade inferior ao da argamassa de referência quando aplicadas nos diversos suportes, provavelmente devido à menor rigidez do AR comparativamente ao AN [12]. Quando aplicadas em tijolo cerâmico com chapisco, verifica-se um aumento do módulo de elasticidade de todas as argamassas; este é ainda superior quando estas são aplicadas em bloco de betão de agregados correntes, com exceção do caso da MRA50 em que o valor em bloco de betão é um pouco inferior ao medido em tijolo cerâmico com chapisco.

Por sua vez as argamassas com AR carbonatados possuem módulo de elasticidade idêntico ou cerca de 7% superior ao das argamassas com AR não carbonatados em todos os suportes, com ênfase para a argamassa MRA50C aplicada em bloco de betão que apresenta um módulo de elasticidade 16% superior ao da argamassa MRA50 aplicada no mesmo suporte.

Tabela 2. Módulo de elasticidade por velocidade de propagação de ultrassons das argamassas aplicadas nos suportes: valor médio e desvio-padrão

Argamassa	Módulo de elasticidade (GPa)		
	Tijolo cerâmico	Tijolo cerâmico com chapisco	Bloco de betão
REF	4.43 ± 1.01	5.82 ± 0.66	6.26 ± 0.72
MRA50	3.99 ± 0.27	5.45 ± 0.44	5.13 ± 0.21
MRA50C	4.26 ± 0.53	5.84 ± 0.90	5.95 ± 0.80
MRA100	3.81 ± 0.12	4.75 ± 0.18	4.99 ± 0.75
MRA100C	4.03 ± 0.46	5.04 ± 0.63	5.41 ± 0.32

3.2. SUSCETIBILIDADE À FISSURAÇÃO

Para avaliar a suscetibilidade à fissuração das argamassas aplicadas nos três suportes estudados, estas foram visualmente analisadas diariamente quanto à formação e aparecimento de fissuras visíveis na sua superfície. Em nenhum caso ocorreu descolamento visual do suporte. As argamassas que possuem 100% de MRA não carbonatado e carbonatado aplicadas em tijolo cerâmico e com 100% de MRA carbonatado aplicadas em tijolo cerâmico com chapisco apresentaram fissuras visíveis, como ilustrado na Figura 4. A fissuração observada nestas argamassas poderá dever-se ao teor elevado de MRA incorporado, que possui uma grande quantidade de finos [13] [14], resultando numa microestrutura pouco compatível com a do respetivo suporte. As restantes argamassas não apresentaram sinais de fissuração visível, ou seja, mesmo as argamassas com elevado teor de MRA (100%), quando aplicadas em bloco de betão, não apresentam fissuração.



Figura 4. Observação da suscetibilidade à fissuração das argamassas: MRA100 aplicado em tijolo cerâmico; MRA100C aplicado em tijolo cerâmico e MRA100C aplicado em tijolo cerâmico com chapisco

3.3. ADERÊNCIA AO SUPORTE

A substituição parcial e total do AN pelo AR MRA reduz a aderência ao suporte das argamassas, independentemente do suporte no qual são aplicadas; esta redução é tanto maior quanto maior for a taxa de incorporação de AR - Tabela 3.

A argamassa REF aplicada no bloco de betão apresenta um valor de aderência ao suporte ($0,81 \pm 0,17$ MPa) 53% superior a quando aplicada em tijolo cerâmico ($0,53 \pm 0,09$ MPa). O mesmo se verifica para todas as argamassas, ou seja, as argamassas aplicadas em bloco de betão apresentam uma aderência ao suporte consideravelmente superior à das argamassas aplicadas no tijolo cerâmico. Relativamente às argamassas com MRA não carbonatado comparativamente à argamassa de referência, a redução mais significativa verifica-se para a argamassa MRA100 aplicada em tijolo cerâmico, que possui um valor de aderência ao suporte 89% inferior ao de REF.

Tabela 3. Aderência ao suporte das argamassas aplicadas nos três suportes: valor médio, desvio padrão (e padrão de rotura)

Argamassa	Aderência ao suporte (MPa)		
	Tijolo cerâmico	Tijolo cerâmico com chapisco	Bloco de betão
REF	0,53 ± 0,09 (A)	0,34 ± 0,03 (A)	0,81 ± 0,17 (B)
MRA50	0,25 ± 0,20 (A)	0,28 ± 0,05 (A/B)	0,48 ± 0,09 (B)
MRA50C	0,39 ± 0,06 (A/B)	0,26 ± 0,02 (A/B)	0,57 ± 0,02 (B)
MRA100	0,06 ± 0,02 (A)	0,15 ± 0,10 (A/B)	0,28 ± 0,03 (B)
MRA100C	0,04 ± 0,02 (A)	0,12 ± 0,13 (A/B)	0,58 ± 0,06 (B)

Padrão de rotura: A - adesiva (na interface argamassa/suporte); B - coesiva (na argamassa); C - coesivo (no suporte)

Em geral, a aplicação de argamassas com incorporação de agregados carbonatados no tijolo cerâmico tal qual e com camada de chapisco não produz um aumento na sua aderência ao suporte, mas pelo contrário provoca uma diminuição, obtendo-se, no caso da substituição total (MRA100 e MRA100C), valores considerados demasiado reduzidos para argamassas de revestimento. No entanto, quando aplicadas em bloco de betão, as argamassas com MRA carbonatado exibem um aumento na aderência ao suporte, com destaque para a argamassa MRA100C, que possui uma aderência ao suporte 93% superior à argamassa MRA100. A diferença registada para aderência ao suporte das argamassas aplicadas em suportes distintos poderá dever-se à porosimetria das argamassas e dos suportes e à compatibilidade entre estas.

Em termos do padrão de rotura verificado para as argamassas aplicadas nos três suportes, verifica-se ser em geral igual para todas as argamassas. Assim, as argamassas aplicadas em tijolo cerâmico apresentam rotura adesiva, na interface entre a argamassa e o suporte, enquanto as argamassas aplicadas em tijolo cerâmico com chapisco apresentam rotura adesiva mas também coesiva (na argamassa), como ilustrado na Figura 5. Por sua vez, as argamassas aplicadas no bloco de betão apresentam um padrão de rotura coesivo na argamassa - Figura 5. Esta diferenciação conforme o suporte indicia desde logo que a ligação argamassa-suporte é maior com o bloco de betão, razão pela qual a rotura ocorre pela argamassa.

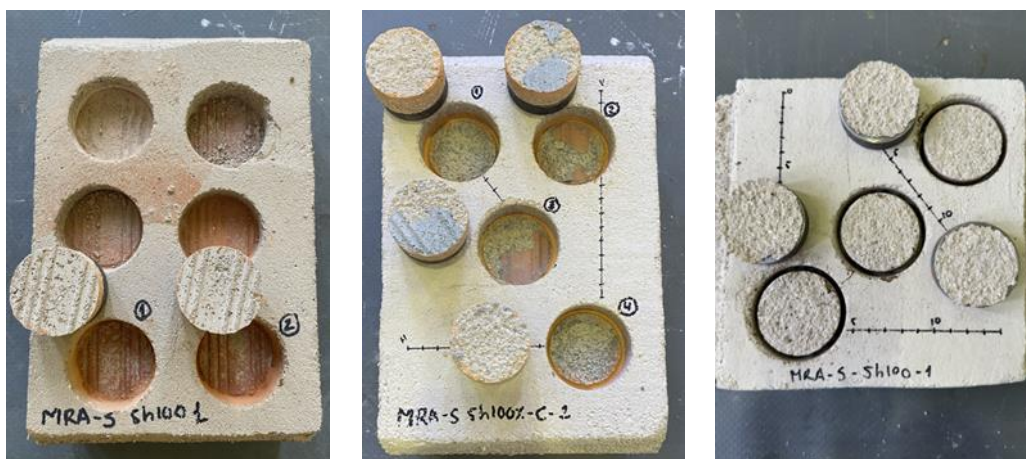


Figura 5. Padrão de rotura das argamassas MRA100C aplicadas em: tijolo cerâmico (rotura adesiva); tijolo cerâmico com chapisco (rotura adesiva / coesiva) e bloco de betão (rotura coesiva na argamassa)

Os requisitos para argamassas de revestimento devem seguir as especificações da Norma Europeia EN 998-1 [15], que não determina valores mínimos para a aderência. No entanto, para além destes, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) recomenda requisitos adicionais para assegurar o bom desempenho dos revestimentos [16]. Estes requisitos, referentes à aderência ao suporte de argamassas de revestimento, requerem que o valor da aderência das argamassas seja superior a 0,3 MPa ou que estas possuam uma rotura coesiva. Assim, a argamassa de referência cumpre os requisitos quando aplicada nos três suportes estudados. Apenas uma das argamassas com AR aplicada em tijolo cerâmico (MRA50C) cumpre este requisito, enquanto as argamassas MRA50 e MRA50C aplicadas em tijolo cerâmico com chapisco cumprem o requisito. No entanto, todas as argamassas aplicadas em bloco de betão cumprem ambos os requisitos, ou seja, todas as argamassas formuladas com MRA não carbonatado e carbonatado estão em conformidade com as exigências do LNEC [16] relativamente à aderência ao suporte de argamassas de revestimento.

3.4. POROSIDADE ABERTA

As argamassas produzidas com AR possuem uma porosidade aberta significativamente superior à da argamassa REF, e essa porosidade aumenta com a quantidade de resíduo incorporado, conforme presente na A carbonatação dos MRA por 5 horas não provocou uma diminuição significativa na porosidade aberta das argamassas em comparação com as argamassas que contêm MRA não carbonatados, ao contrário do que era esperado face ao aumento da massa volúmica dos MRA após a carbonatação [17] [18]. Em contrapartida, as argamassas com MRA carbonatado, quando aplicadas em bloco de betão, apresentam uma porosidade aberta superior à das argamassas com MRA não carbonatados (12% e 18% para MRA50C e MRA100C, respetivamente). No entanto, considerando todas as argamassas com MRA, estas argamassas (MRA50C e MRA100C aplicadas em bloco de betão) são as que apresentam maior aderência ao suporte - Figura 6. Esta relação entre porosidade e aderência parece contraditória com o que seria esperado (esperar-se-ia que maior compacidade correspondesse a maior aderência) e indicia que o fator físico que mais influencia a aderência não é a porosidade aberta, mas muito provavelmente a dimensão predominante dos poros, ou seja, a estrutura porosimétrica.

Tabela 4. As maiores diferenças entre a porosidade aberta das argamassas com MRA não carbonatado e a argamassa de referência foram verificadas para as argamassas aplicadas em tijolo cerâmico sem camada de chapisco (34% e 57% superior para MRA50 e MRA100, respetivamente).

A carbonatação dos MRA por 5 horas não provocou uma diminuição significativa na porosidade aberta das argamassas em comparação com as argamassas que contêm MRA não carbonatados, ao contrário do que era esperado face ao aumento da massa volúmica dos MRA após a carbonatação [17] [18]. Em contrapartida, as argamassas com MRA carbonatado, quando aplicadas em bloco de betão, apresentam uma porosidade aberta superior à das argamassas com MRA não carbonatados (12% e 18% para MRA50C e MRA100C, respetivamente). No entanto, considerando todas as argamassas com MRA, estas argamassas (MRA50C e MRA100C aplicadas em bloco de betão) são as que apresentam maior aderência ao suporte - Figura 6. Esta relação entre porosidade e aderência parece contraditória com o que seria esperado (esperar-se-ia que maior compacidade correspondesse a maior aderência) e indicia que o fator físico que mais influencia a aderência não é a porosidade aberta, mas muito provavelmente a dimensão predominante dos poros, ou seja, a estrutura porosimétrica.

Tabela 4. Porosidade aberta das argamassas aplicadas nos três suportes

Argamassa	Porosidade aberta (%)		
	Tijolo cerâmico	Tijolo cerâmico com chapisco	Bloco de betão
REF	17.6 ± 0.8	20.7 ± 0.3	19.4 ± 0.5
MRA50	23.5 ± 0.1	24.4 ± 0.7	24.7 ± 0.2
MRA50C	22.5 ± 0.6	23.5 ± 0.8	27.7 ± 0.6
MRA100	27.7 ± 0.7	27.2 ± 0.7	24.9 ± 0.3
MRA100C	26.6 ± 0.7	27.3 ± 1.2	29.4 ± 1.0

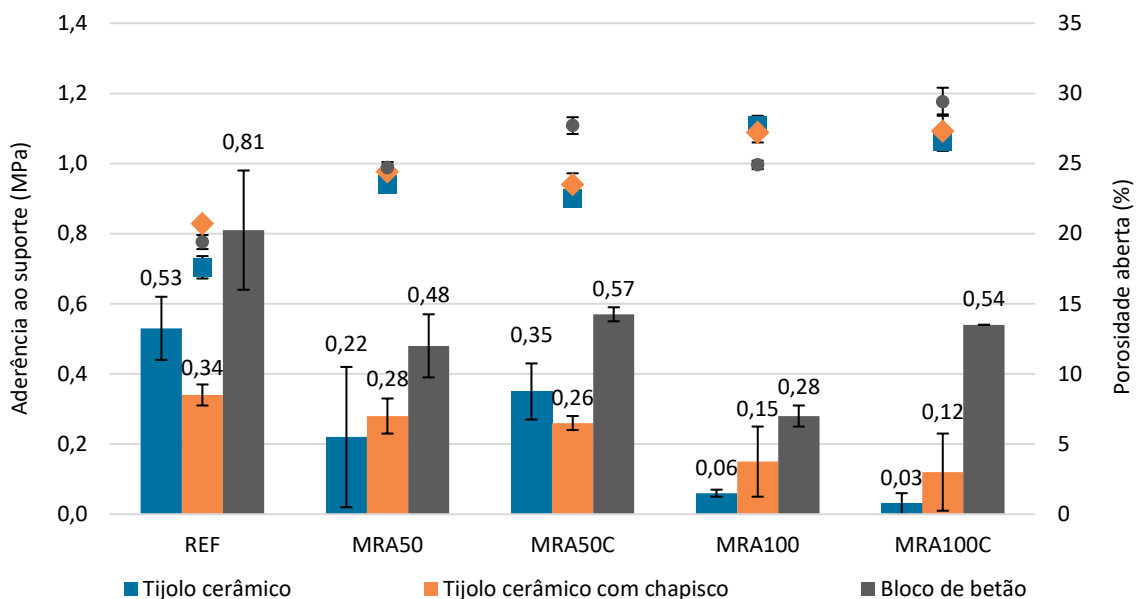


Figura 6. Aderência ao suporte e porosidade aberta das argamassas aplicadas nos três suportes

4. CONCLUSÕES

O presente artigo apresenta o estudo inicial da influência do tipo de suporte no desempenho de argamassas de revestimento com incorporação de agregados reciclados de RCD (resíduos de construção e demolição) sujeitos a carbonatação forçada, nomeadamente na sua aderência ao suporte.

Argamassas cimentícias de revestimento foram aplicadas em três suportes distintos: tijolo cerâmico furado, o mesmo tijolo cerâmico com uma camada de chapisco e bloco de betão de agregados correntes. Para a formulação destas argamassas, foi incorporado um agregado reciclado (AR) misto comercializado por uma operadora de gestão de resíduos portuguesa (MRA), substituindo o agregado natural (AN) em 50% e 100%, em volume. O agregado reciclado foi incorporado no seu estado natural, ou seja, após a receção, secagem, britagem e peneiração, e também após ser submetido a carbonatação forçada e acelerada por um período de 5 horas. As argamassas foram analisadas quanto ao seu módulo de elasticidade, suscetibilidade à fissuração, aderência ao suporte, e porosidade aberta.

As argamassas com MRA apresentam módulos de elasticidade menores que a argamassa de referência devido à menor rigidez dos AR. No entanto, a aplicação em tijolo cerâmico com chapisco ou em blocos de betão aumenta significativamente o módulo de elasticidade, apesar de tal não se refletir na porosidade aberta. Argamassas com MRA carbonatado têm módulo de elasticidade semelhante ao das com MRA não carbonatados, com destaque para a argamassa com 50% de MRA carbonatado aplicada em bloco de betão, que apresenta um aumento de 16%.

Em termos da suscetibilidade à fissuração, as argamassas com 100% de MRA não carbonatado e carbonatado aplicadas em tijolo cerâmico desenvolveram fissuras visíveis, possivelmente devido ao alto teor de finos do agregado. No entanto, as argamassas aplicadas em blocos de betão, mesmo com o elevado teor de MRA, não apresentaram fissuras, o que poderá estar relacionado com a maior aderência, que permite uma melhor distribuição de tensões.

A aderência ao suporte diminui com a substituição do AN por MRA, sendo mais acentuada com a maior incorporação de resíduo. Argamassas aplicadas em blocos de betão possuem aderência superior à das aplicadas em tijolo cerâmico, mesmo com uma camada de chapisco que se esperava poder potenciar a aderência. As argamassas com MRA carbonatado em blocos de betão apresentam um aumento significativo na aderência, especialmente a que possui 100% de MRA carbonatado, que possui uma aderência 93% superior à da argamassa com 100% de MRA não carbonatado. Os padrões de rotura variam consoante o tipo de suporte: as argamassas aplicadas em tijolo cerâmico apresentam rotura adesiva, o que confirma uma reduzida ligação argamassa-suporte, enquanto as argamassas aplicadas no tijolo com chapisco apresentam rotura mista adesiva e coesiva, e as aplicadas em bloco de betão mostram rotura coesiva, provando ser as argamassas com maior aderência ao suporte.

Relativamente à porosidade aberta das argamassas com MRA, esta é significativamente superior à da argamassa de referência, especialmente em aplicações em tijolo cerâmico. A carbonatação dos MRA por 5 horas não reduziu a porosidade aberta da argamassa, ao contrário do esperado, comparativamente às argamassas com MRA não carbonatado. Pelo contrário, as argamassas com MRA carbonatado em bloco de betão apresentam maior porosidade aberta e também maior aderência ao suporte, possivelmente devido à porosimetria das argamassas e dos suportes. Este aspeto deverá ser investigado em detalhe em trabalhos futuros.

Conforme os requisitos estabelecidos pelo LNEC para argamassas de revestimento, a argamassa de referência cumpre os requisitos de aderência ou rotura coesiva em todos os suportes avaliados. Entre as argamassas com MRA aplicadas em tijolo cerâmico, apenas a MRA50C cumpre os requisitos, enquanto com chapisco tanto a MRA50 quanto a MRA50C são adequadas. Todas as argamassas aplicadas em bloco de betão atendem aos requisitos especificados, independentemente do tipo de MRA (carbonatado ou não) e teor de substituição (50% ou 100%) utilizado.

A incorporação de MRA de RCD carbonatado nas argamassas altera as suas propriedades de aderência ao suporte, dependendo do tipo de suporte no qual são aplicadas, tendo-se verificado um comportamento adequado às funções que lhes são exigidas quando aplicadas em bloco de betão de agregados correntes. Desta forma, é possível a utilização de RCD e, em particular, de RCD misto sujeito a carbonatação forçada, na formulação de novos produtos de construção, tais como argamassas de revestimento, enquanto se captura CO₂, reduzindo a extração de recursos naturais e a pegada ecológica destes produtos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), e à unidade de investigação CERIS do Instituto Superior Técnico (IST) pelo apoio dado a esta investigação.

Referências

- [1] Noviani, L.; Haryono, E.; Supartono, W.; Sahali, I.; Juliani, F. E., 2023. "Environmental impact analysis of PCC cement products (Portland Composite Cement) using LCA (Life Cycle Assessment)", IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., 1190, 1.
- [2] CEN, 2009. "EN 933-11, Tests for geometrical properties of aggregates. Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate", CEN, Brussels.
- [3] 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", Constr. Build. Mater., 361, October, 129623.
- [4] Brazão Farinha, C.; de Brito, J.; Veiga, R., 2015. "Incorporation of fine sanitary ware aggregates in coating mortars", Constr. Build. Mater., 83, 194–206.
- [5] R. Veiga et al., "Durability of lime based renders: A review of some degradation mechanisms and assessment test methods," SMS19 Rovinj, no. 1, pp. 1–8, 2019.
- [6] Penacho, P.; de Brito, J.; Veiga, R., 2014. "Physico-mechanical and performance characterization of mortars incorporating fine glass waste aggregate", Cem. Concr. Compos., 50, 47–59.
- [7] Infante Gomes, R.; Pederneiras, C. M.; Brazão Farinha, C.; Veiga, R.; de Brito, J.; Faria, P., 2022. "Argamassas com agregados reciclados de RCD submetidos a carbonatação forçada: Avaliação do seu comportamento em aplicações em suporte de tijolo", Pedra & Cal, 72, 24-28.
- [8] Brazão Farinha, C.; Maia Pederneiras, C.; Bastos, D.; Infante Gomes, R.; Veiga, R.; Santos Silva, A.; Martins, I., 2023. "CDW as sources of CO₂ absorption", Proceedings of V International Conference Progress of Recycling in the Built Environment, 10 a 12 de outubro, Weimar, Alemanha.
- [9] CEN, 2004. "EN 12504-4, Testing concrete in structures - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity", CEN, Brussels.
- [10] CEN, 2016. "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, Brussels.
- [11] CEN, 2007. "EN 1936, Natural stone test methods. Determination of real density and apparent density and total and partial open porosity", CEN, Brussels.
- [12] Ferreira, R. L. S.; Anjos, M. A. S.; Nóbrega, A. K. C.; Pereira, J. E. S.; Ledesma, E. F., 2019. "The role of powder content of the recycled aggregates of CDW in the behaviour of rendering mortars", Constr. Build. Mater., 208, 601–612.
- [13] Liu, Q.; Xiao, J.; Singh, A., 2021. "Quantification of plastic shrinkage and cracking in mortars containing different recycled powders using digital image correlation technique," Constr. Build. Mater., 293, 123509.
- [14] Miranda, L. F. R.; Selmo, S. M. S., 2006. "CDW recycled aggregate renderings: Part I - Analysis of the effect of materials finer than

75 µm on mortar properties”, *Constr. Build. Mater.*, 20, 9, 615–624.

[15] CEN, 2013. “EN 998-1, Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar”, CEN, Brussels.

[16] Vilhena, A.; Veiga, R., 1995. "Bases para a homologação de revestimentos pré-doseados de ligante mineral com base em cimento. Lisboa, LNEC. Relatório 289/95-NCct.

[17] Infante Gomes, R.; Bastos, D.; Brazão Farinha, C.; Maia Pederneiras, C.; Veiga, R.; de Brito, J.; Faria, P.; Santos Silva, A., 2021. “Mortars with CDW recycled aggregates submitted to high levels of CO₂”, *Infrastructures*, 6, 159.

[18] 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,” *Constr. Build. Mater.*, 257, 119486.