

## DURABILIDADE DOS BETÕES COM CINZAS VOLANTES FACE À CARBONATAÇÃO EM AMBIENTE MARINHO

RAPHAELE MALHEIRO<sup>1\*</sup>, AIRES CAMÕES<sup>1</sup>, GIBSON MEIRA<sup>2</sup>

1: CTAC - Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho  
Campus de Azurém, 4800-058, Guimarães, Portugal  
raphamalheiro@gmail.com, aires@civil.uminho.pt

2: IFPB - Instituto Federal da Paraíba IFPB  
R. Dep. Balduino M. de Carvalho, 155/1104, 58.036-860 João Pessoa, Brasil  
gibsonmeira@yahoo.com

**Resumo** A indústria cimenteira destaca-se como sendo o segundo maior emissor industrial de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Neste sentido, a redução do uso do cimento no betão, sem prejuízo dos avanços técnicos já adquiridos, é uma tendência mundial. A substituição parcial do cimento por cinzas volantes (CV) no betão tem sido utilizada com vantagens ao nível técnico, económico e ambiental. Os betões com CV destacam-se pela elevada resistência ao ataque por cloretos (Cl<sup>-</sup>), sendo menos resistentes à carbonatação. Este trabalho experimental tem como objetivo avaliar o comportamento dos betões com CV face à carbonatação, em ambientes marinhos. Assim, foram moldados provetes de argamassa e betão com 0 e 40% de substituição de cimento por CV. Para tal, foram utilizados ensaios acelerados para contaminação dos provetes por Cl<sup>-</sup> e CO<sub>2</sub>. Os resultados apontam para uma redução da profundidade de carbonatação dos provetes sujeitos ao contato com os Cl<sup>-</sup> e CO<sub>2</sub> quando comparados aos provetes sujeitos apenas ao CO<sub>2</sub>, independentemente do percentual de CV. Considerando a menor resistência do betão com CV face à carbonatação, esta redução na profundidade de carbonatação aponta para uma dimensão positiva relacionada ao seu uso. Aspectos relacionados à porosidade do betão e ao efeito higroscópico do cloreto de sódio (NaCl), podem estar na origem deste comportamento.

**Palavras-chave:** Cinzas volantes, Betão, Sustentabilidade, Carbonatação, Cloretos.

**Abstract** The cement industry is the second largest industrial emitter of (carbon dioxide) CO<sub>2</sub>. Reducing the use of cement in concrete, and maintaining its technical qualities is a worldwide trend. The partial replacement of cement by fly ash (FA) in concrete has been used with technical, economical, and environmental advantages. Concretes with FA have greater chloride (Cl<sup>-</sup>) attack resistance, but the carbonation resistance is lower. This experimental research aims to evaluate the behaviour of concretes with FA in relation to carbonation, in marine environments. Specimens were moulded with 0 and 40% replacement of cement by FA. Accelerated tests were used to contaminate the specimens with Cl<sup>-</sup> and CO<sub>2</sub>. According to the obtained results, there is a reduction in carbonation depth in the specimens submitted to Cl<sup>-</sup> and CO<sub>2</sub> when compared to those submitted only to CO<sub>2</sub>, regardless of the percentage of FA. Considering the limited resistance of concrete with FA related to carbonation, this reduction in carbonation depth is a positive aspect. The porosity of concrete and the hygroscopic effect of sodium chloride (NaCl) may be at the origin of this behaviour.

**Key-words:** Fly ash, Concrete, Sustainability, Carbonation, Chlorides.

### 1. INTRODUÇÃO

O impacto das alterações climáticas tem-se tornando cada vez mais evidente em todo o mundo, com repercussões importantes nas atividades quotidianas. A União Europeia tem tentado combater as alterações climáticas através da implementação de políticas ambiciosas em estreita cooperação com

os parceiros internacionais. Uma economia com zero emissões de gases de efeito estufa (GEE), neutralidade carbônica, é uma importante meta da União Europeia para 2050. Dentre os GEE, o CO<sub>2</sub> destaca-se como um dos principais responsáveis pelas alterações climáticas, tendo sido emitidas 0,59 t CO<sub>2</sub>/t cimento em 2020 [1]. Assim, de acordo com a Associação Europeia de Cimento [2], alcançar a neutralidade carbônica até 2050 é uma ambição, também, do setor cimenteiro. De acordo com a Agência Internacional de Energia [1], são necessários declínios anuais de 3% até 2030 para que esta meta seja atingida. Assim, a redução do uso do cimento no betão, sem prejuízo dos avanços técnicos já adquiridos, é um objetivo mundial.

Uma das estratégias estudadas pela comunidade científica tem sido a redução do consumo de cimento em betões e argamassas, através da sua substituição parcial por resíduos ou subprodutos industriais [3–5]. Neste sentido, a substituição parcial do cimento por cinzas volantes (CV) no betão tem sido utilizada com vantagens ao nível técnico, económico e ambiental. Os betões com CV destacam-se pela elevada resistência ao ataque por cloretos, que pode ocorrer em ambientes marinhos (classe XS, LNEC E-464 [6]) ou em ambientes específicos (classe XD, LNEC E-464[6]). Por outro lado, são pouco resistentes ao efeito da carbonatação (classe XC, LNEC E-464 [6]) que, por se tratar de uma reação que se desenvolve através do contato com o CO<sub>2</sub>, pode ocorrer, com maior ou menor intensidade, em qualquer ambiente onde a estrutura de betão esteja inserido.

A ação de cada um destes agentes agressores, Cl<sup>-</sup> e CO<sub>2</sub>, sobre o betão tem sido amplamente investigada de forma isolada. Contudo, o estudo sobre a combinação de mecanismos de degradação é algo relativamente recente e que alcança maior expressividade a partir do ano 2000. Os cloretos e a carbonatação podem agir de forma combinada em diversos ambientes como, por exemplo, pontes com utilização de sais de gelo-degelo e túneis inseridos em ambientes com influência marinha. Apesar da ação combinada destes agentes agressores ser uma realidade, ainda não há consenso sobre o efeito da ação combinada dos cloretos e da carbonatação sobre a durabilidade do betão com e sem CV.

A grande maioria dos estudos encontrados sobre o assunto incide sobre o efeito da carbonatação sobre a penetração de cloretos. De acordo com Basheer *et al.* [7], em casos extremos, a taxa de corrosão em estruturas reais, devido à ação dos iões cloretos, pode chegar aos 5 mm/ano e, devido à carbonatação, pode chegar aos 0,05 mm/ano. Assim, devido ao caráter supostamente secundário que a carbonatação assume dentro da ação combinada com os iões cloretos, as investigações que procuram compreender o efeito da ação dos iões cloreto sobre a carbonatação são escassas [8–10]. Em parte destas investigações, a ação sobre a carbonatação não é o tema central da pesquisa, sendo possível, contudo, retirar algumas conclusões sobre a ação dos cloretos no avanço da carbonatação.

Kuosa *et al.* [11] realizaram testes de migração de cloretos em provetes e, após pré-condicionamento, foram colocados em câmara de carbonatação por 56 dias. Suas conclusões indicam que a carbonatação de provetes previamente expostos a cloretos correspondeu a apenas 54% da carbonatação de provetes sem esta exposição prévia. O estudo realizado por Wang *et al.* [12] é semelhante ao de Kuosa *et al.* [11] pois encontrou redução no consumo de hidroxilas (OH<sup>-</sup>) em provetes de betão, após três meses de exposição a cloretos seguidos de pré-condicionamento e exposição a CO<sub>2</sub> por um, dois e três meses.

Assim, de forma a contribuir para o avanço desta importante discussão, este trabalho experimental tem como objetivo avaliar o comportamento dos betões com CV face à carbonatação, em ambientes marinhos.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Material utilizado

Foram utilizados provetes em argamassa e em betão. Os provetes em argamassa foram utilizados

numa primeira fase da investigação com o objetivo de acelerar a penetração dos agentes agressores devido à sua elevada porosidade (quando comparada ao betão). Foram moldados corpos de prova cilíndricos, com diâmetro e altura iguais a 50 mm, e cúbicos, com aresta igual a 50 mm. Utilizou-se areia siliciosa natural, o cimento CEM 42,5R e as cinzas volantes (CV) provenientes da termoelétrica do Pego, Portugal. A sua composição química pode ser vista na Tabela 1. Para as argamassas, utilizou-se um rácio em massa de 1:3 (cimento: areia) e a relação água/ligante utilizada foi de 0,52 para os provetes com 40% de substituição de cimento por CV. No caso dos provetes de referência não foram utilizadas CV e a relação água/ligante foi igual 0,56, diferente da anterior de forma a manter constante a trabalhabilidade, aferida pelo ensaio de espalhamento, em torno de 190 mm.

Tabela 1. Composição química do cimento e das cinzas volantes.

Composição	CEM 42,5 (%)	CV (%)
SiO <sub>2</sub>	19,65	40,87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,28	22,72
FeO <sub>3</sub>	3,35	6,81
CaO	61,35	1,97
MgO	1,7	1,18
SO <sub>3</sub>	3,36	1,08
K <sub>2</sub> O	0,89	2,78
Na <sub>2</sub> O	0,19	0,82
Resíduo insolúvel	1,7	-
Perda ao fogo	2,82	5,60

Para os provetes em betão foram utilizados, além dos materiais já citados, um superplastificante (Glenium SKY 617® que possui como base uma cadeia de éter policarboxílico modificado) e dois tipos de brita. A composição, por m<sup>3</sup>, do betão pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 2. Composição do betão por m<sup>3</sup>.

Material	B0	B40
Cimento (kg)	380,00	228,00
CV (kg)	-	152,00
Água (l)	190,16	191,86
Superplastificante (%)	0,45	-
Areia 0/4 (kg)	989,83	926,18
Brita 4/8 (kg)	261,30	281,18
Brita 6/12 (kg)	492,64	483,10

## 2.2 Ensaio acelerados

Os ensaios acelerados apresentam-se como uma grande mais-valia para a investigação uma vez que a penetração dos agentes agressores em causa, Cl<sup>-</sup> e CO<sub>2</sub>, ocorrem num horizonte temporal bastante distinto daquele destinado à maior parte das investigações laboratoriais. Neste sentido, foram utilizados 4 diferentes tipos de ensaios acelerados: ciclos de molhagem/secagem, difusão de cloretos por imersão [13], difusão de cloretos por migração [14] e carbonatação acelerada com recurso à câmara de carbonatação [15].

No caso do ensaio de difusão de cloretos por imersão, os provetes são imersos em solução saturada de hidróxido de cálcio, a qual se adiciona 15% de cloreto de sódio. Após o período definido para

exposição aos cloretos, os provetes são retirados da imersão. No que se refere ao ensaio de difusão de cloretos por migração, os provetes são saturados em hidróxido de cálcio e, em seguida, submetidos a uma diferença de potencial durante um período pré-estabelecido, em função da corrente inicial.

Estes ensaios foram realizados de maneira distinta para a argamassa e para o betão:

- Argamassa: ensaios cíclicos

Os ensaios cíclicos de molhagem/secagem, apesar de muito utilizados na literatura, não possuem referências normativas para a sua utilização. Neste sentido, com base em experiências laboratoriais anteriores da equipa de investigação [16], optou-se por utilizar um ciclo com um período total de 7 dias. Foi utilizado apenas 1 dia para imersão, ficando os restantes 6 dias reservados para o processo de secagem. Os ensaios cíclicos foram realizados por dois períodos (2 e 6 meses), de modo a simular duas situações principais:

- Situação combinada - Ciclo A: imersão em solução contendo Cl<sup>-</sup> e secagem em câmara de carbonatação (CO<sub>2</sub>);
- Situação de referência - Ciclo B: imersão em H<sub>2</sub>O e secagem em câmara de carbonatação (CO<sub>2</sub>).

A câmara de carbonatação utilizada durante os ensaios foi uma ARALAB FITOCLIMA S600 e foi calibrada de acordo com a EN 12390-12 [15] que indica os seguintes parâmetros para a realização do ensaio de carbonatação: T = 20 ±2°C, HR = 55 ±5% e CO<sub>2</sub> = 4 ±0,50%. Já a concentração de Cl<sup>-</sup> utilizada na solução de imersão teve como base a quantidade média de íões cloreto existente na água do oceano atlântico, 3,50% [17]. Aqui, além de trocar semanalmente a solução de imersão, tomou-se o cuidado de manter os recipientes das soluções sempre fechados para diminuir a evaporação da água e, conseqüentemente evitar o aumento da concentração dos Cl<sup>-</sup>.

- Betões: ensaios combinados

Considerando que a elevada humidade relativa, possivelmente presente nos ensaios cíclicos, possa, de alguma maneira, condicionar o desenvolvimento da frente de carbonatação, optou-se por utilizar outra estratégia para os provetes de betão. Assim, optou-se por utilizar a combinação de ensaios normalizados de acordo com a configuração apresentada na Figura 1.

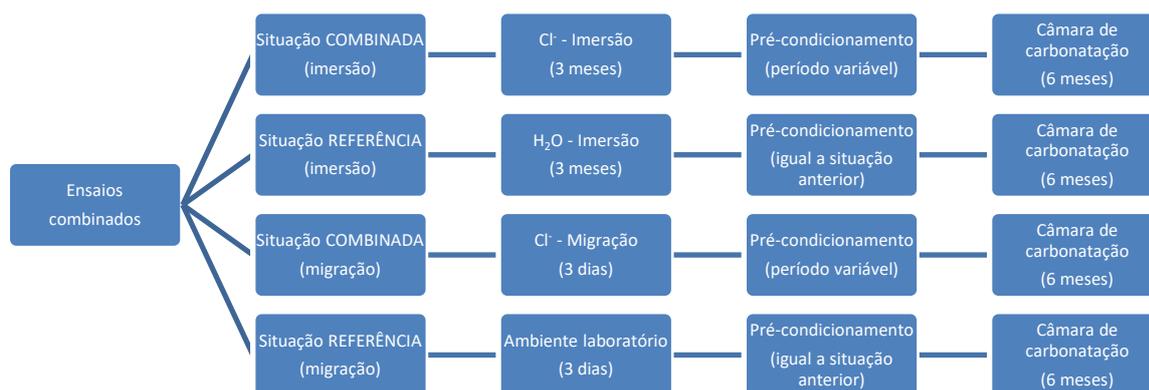


Figura 1. Configuração de ensaio utilizada para os ensaios combinados.

A fim de determinar a profundidade de carbonatação, no final dos ensaios (tanto para a argamassa quanto para o betão) as amostras foram partidas de forma perpendicular à direção da penetração dos agentes agressores (Figura 2 (a)), sendo que depois as partes foram aspergidas com fenolftaleína

(Figura 2 (b)) com base na recomendação RILEM CPC-18 [18].

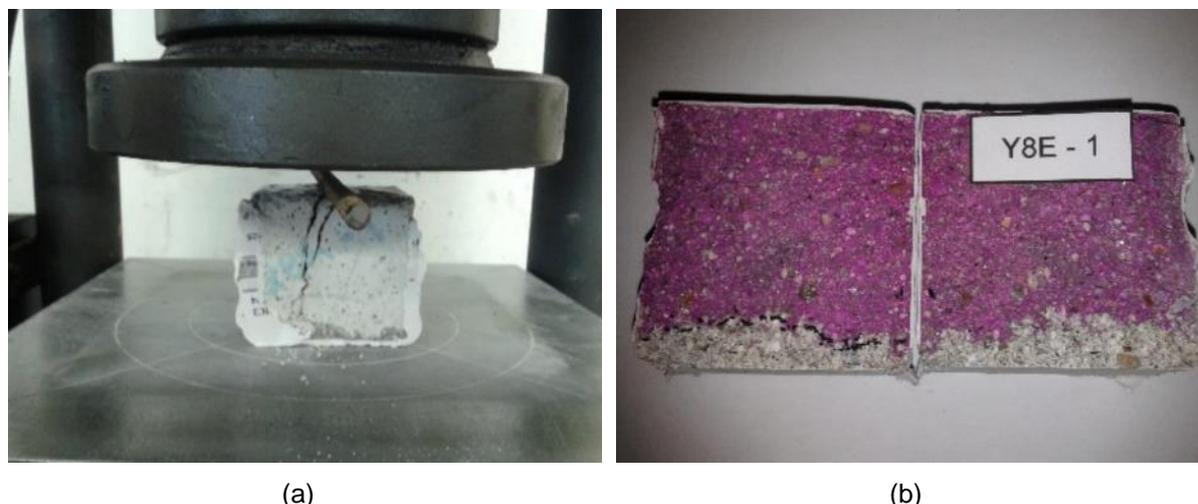


Figura 2. Determinação da profundidade de carbonatação: (a) Rompimento do provete; (b) Provete após aspersão de fenolftaleína.

### 2.3 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade, com base na especificação LNEC E393 [19], foi realizado ao final do período de ensaio a fim de ajudar a conhecer um pouco mais sobre a porosidade dos materiais estudados e, desta forma, auxiliar na discussão dos resultados.

O ensaio consiste em medir, durante três dias, a quantidade de água absorvida através de apenas uma face de um provete não saturado imerso em um filme de água de  $5 \pm 1$  mm. A absorção de água por capilaridade é a diferença entre a massa endurecida do betão, que teve uma face em contato com a água durante um tempo e a massa seca do betão, dividida pela área superficial que esteve em contato com a água.

## 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 3.1 Argamassa: ciclos de imersão e secagem

A Tabela 3 apresenta as profundidades de carbonatação atingidas para as argamassas estudadas, após 2 e 6 meses de ensaios cíclicos.

Tabela 3. Profundidade de carbonatação obtida para as argamassas estudadas através de ciclos de molhagem/secagem.

Identificação	% CV	Período de ensaio (meses)	Profundidade de carbonatação (mm)			
			Ciclo A (Cl/CO <sub>2</sub> )	Cov*	Ciclo B (H <sub>2</sub> O/CO <sub>2</sub> )	Cov*
A0-2	0	2	3,60	25,00	7,60	13,16
A0-6	0	6	4,80	14,58	5,60	7,14
A40-2	40	2	11,50	2,60	16,50	8,48
A40-6	40	6	13,40	3,73	18,30	3,82

\*Coeficiente de variação (%)

Considerando os dados apresentados na Tabela 3, é evidente um aumento na profundidade de carbonatação para as argamassas com CV quando comparadas aquelas sem CV, tanto para o Ciclo A, quanto para o Ciclo B. O Ciclo B, considerando 6 meses de ensaio, apresenta o aumento mais expressivo, 327%. Este comportamento está reportado na literatura e relaciona-se com o consumo do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  existente na matriz de cimento que é consumido pelas reações pozolânicas proporcionadas pela presença das CV [20], o que facilita o avanço da frente de carbonatação.

No que diz respeito à influência da presença dos cloretos durante o ciclo de molhagem/secagem no desenvolvimento da profundidade de carbonatação, observa-se uma redução na profundidade de carbonatação atingida para os provetes submetidos ao Ciclo A, quando comparados aos provetes submetidos ao Ciclo B. Esta redução acontece tanto para as argamassas sem CV quanto para aquelas com CV. Contudo, este efeito de redução da profundidade de carbonatação em ambiente contaminado com cloretos é mais pronunciado para as argamassas sem CV. Para tentar entender melhor as alterações ocorridas na rede porosa do material estudado e as suas implicações, ou não, nos resultados alcançados foram realizados ensaios de absorção capilar de água de acordo com a especificação LNEC E-393 [19]. A Figura 3 apresenta estes resultados.

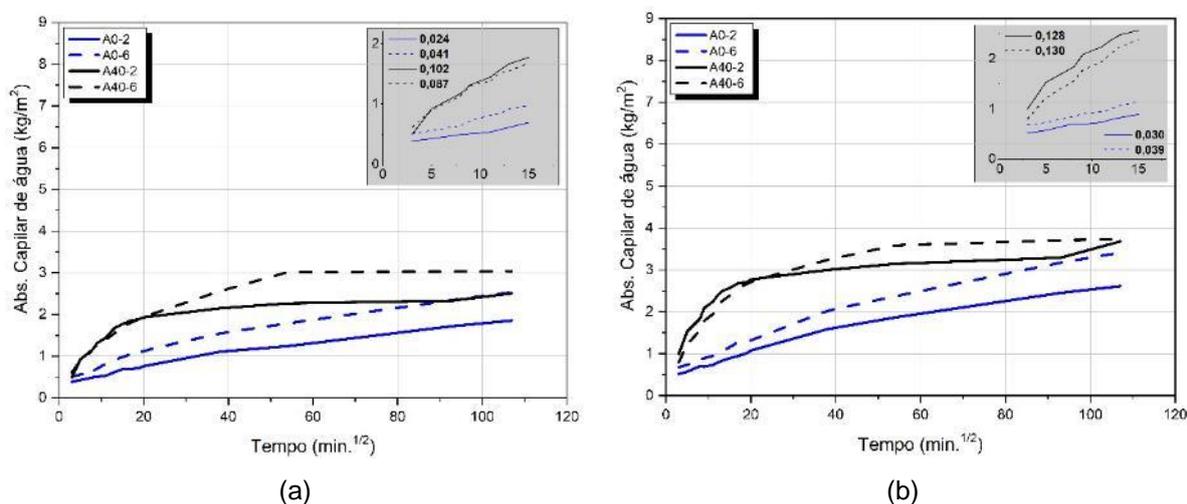


Figura 3. Curvas de absorção capilar de água obtidas para as argamassas após serem submetidas aos ciclos de molhagem/secagem: (a) Ciclo A ( $\text{Cl}^-/\text{CO}_2$ ); (b) Ciclo B ( $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ ).

Observando as curvas de absorção capilar apresentadas na Figura 3, como esperado para este tipo de ensaio, o comportamento observado reflete uma absorção capilar mais significativa na fase inicial, com uma maior inclinação da curva, e que, de seguida, adquire um ritmo mais lento, chegando, em alguns casos, ao patamar de estabilização de valores, que representa o preenchimento da rede capilar. Esta diferença de ritmo encontra explicação no facto da água penetrar primeiro nos poros de maiores dimensões acessíveis, preenchendo posteriormente os poros capilares mais finos (onde a absorção é mais lenta) e os poros cujo acesso depende desses menores [21].

Além disso, é possível identificar uma tendência para redução da absorção capilar de água para os provetes submetidos ao ambiente contaminado com cloretos (Ciclo A), quando comparados aos provetes que estiveram submetidos apenas à ação do  $\text{CO}_2$  (Ciclo B). Os coeficientes de absorção capilar apresentados em pormenor na Figura 3 confirmam esta tendência. Considerando que a absorção capilar de água ocorre através da porosidade aberta da matriz cimentícia, é possível que haja uma redução na porosidade aberta das argamassas que pode estar relacionada com a redução da

profundidade de carbonatação atingida por estes mesmos provetes (Tabela 3). Considerando, também, que a carbonatação se desenvolve mais lentamente em ambiente com elevada humidade [22], o caráter higroscópico do sal também é apontado por alguns autores como possível causa para esta redução na profundidade de carbonatação [23].

### 3.2 Betões: combinação entre ensaios acelerados

A Tabela 4 apresenta as profundidades de carbonatação atingidas para os betões estudados durante 7 meses, através de diferentes combinações de ensaios acelerados.

Tabela 4. Profundidade de carbonatação obtida para os betões através da combinação de ensaios.

Identificação	% CV	Período de ensaio (meses)	Profundidade de carbonatação (mm)			
			Combinado	DP*	Referência	DP*
<b>B0-I</b>	0	6	2,08	0,37	16,61	1
<b>B0-M</b>	0	6	4,01	0,90	13,50	0,15
<b>B40-I</b>	40	6	23,32	2,48	31,09	1,92
<b>B40-M</b>	40	6	24,17	2,60	30,09	1,09

\*Desvio padrão

Considerando os dados da Tabela 4, verifica-se um aumento na profundidade de carbonatação para os betões com CV quando comparados aqueles sem CV, tanto para o ensaio de referência quanto para o ensaio combinado. Comportamento similar foi verificado para os provetes em argamassa (Tabela 3), estando relacionado com o elevado consumo do  $\text{Ca(OH)}_2$  que ocorre nos betões com CV.

No que diz respeito à influência da presença dos cloretos sobre o desenvolvimento da profundidade de carbonatação, observa-se uma redução na profundidade de carbonatação atingida para os provetes previamente contaminados por cloretos (situação combinada), quando comparados aos provetes submetidos apenas ao ensaio de carbonatação (situação de referência). Este comportamento verifica-se independentemente do tipo de ensaio acelerado utilizado para contaminação por cloretos, ou seja, ocorre tanto para o ensaio de difusão de cloretos por migração, quanto para o ensaio de difusão de cloretos por imersão. Contudo, o efeito de redução da profundidade de carbonatação em ambiente contaminado com cloretos é mais pronunciado para os betões sem CV, submetidos ao ensaio de difusão por imersão. Tal como para as argamassas, também para os betões foram realizados ensaios de absorção capilar de água. Neste caso, optou-se por realizar o ensaio apenas para os provetes contaminados com cloretos através do ensaio de difusão de cloretos por imersão, por se tratar de um ensaio mais prolongado no tempo, podendo resultar em alterações mais significativas no que diz respeito à rede porosa do betão estudado. A Figura 4 apresenta as curvas de absorção capilar e os respectivos coeficientes de absorção para estes provetes.

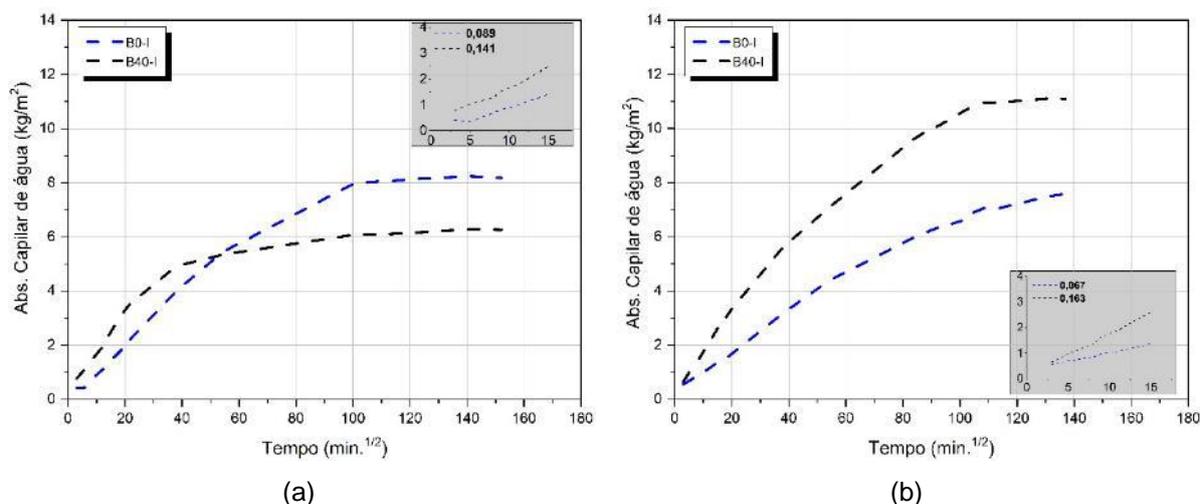


Figura 4. Curvas de absorção capilar de água obtidas para os betões após serem submetidos aos ensaios combinados: (a) Situação combinada (difusão de cloretos por imersão – carbonatação); (b) Situação de referência (imersão em água – carbonatação).

As curvas da Figura 4 apresentam um desenvolvimento que vai ao encontro do esperado para este tipo de ensaio. No entanto, há algumas diferenças significativas entre as curvas apresentadas. Enquanto os provetes submetidos a situação combinada (Figura 4 (a)) atingem um patamar de estabilização por volta dos 100  $\text{min.}^{1/2}$  de ensaio, os provetes de referência (Figura 4 (b)) não chegam a atingir este patamar durante o período de ensaio. Este comportamento indicia a existência de mais poros de maior dimensão nos provetes de referência, o que facilita a penetração dos agentes agressores, neste caso, mais concretamente, facilita o avanço do  $\text{CO}_2$ . Esta tendência de comportamento é observada para os betões, independentemente da presença de CV.

#### 4. CONCLUSÕES

A interação entre carbonatação e a presença de iões cloreto em materiais cimentícios foi avaliada experimentalmente. O efeito da presença de cloretos no desenvolvimento da frente de carbonatação foi avaliado através da utilização de ensaios acelerados.

Os resultados apontam para uma redução da profundidade de carbonatação nas argamassas e betões quando inseridos em ambientes contaminados por cloretos. Esta tendência verifica-se independentemente da presença de CV, mas ocorre de forma mais pronunciada para os provetes sem CV. Aspetos relacionados à porosidade do betão e ao efeito higroscópico do NaCl, podem estar na origem deste comportamento. No caso da porosidade, foi possível observar uma redução da porosidade aberta para os provetes inseridos em ambientes contaminados por cloretos. Considerando a menor resistência do betão com CV face à carbonatação, esta redução na profundidade de carbonatação aponta para uma dimensão positiva relacionada ao seu uso nestes ambientes.

Estes resultados ajudam a conhecer melhor a durabilidade de estruturas que utilizam adições pozolânicas em sua composição, ajudando a torná-las estruturas mais duráveis e, conseqüentemente, mais sustentáveis. Apesar disso, importa lembrar que os ensaios acelerados utilizados promovem um ambiente específico, com uma configuração própria e diferente do ambiente real. Neste sentido, a transposição destes resultados para ambientes reais deve ser realizada com cautela.

---

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por Fundos Nacionais através da FCT/MCTES – Fundação para a Ciência e Tecnologia/Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, no âmbito do CTAC – Centro de Território, Ambiente e Construção – UIDB/0407/2020 e UIDP/04047/2020.

## REFERÊNCIAS

- [1] Direct CO<sub>2</sub> intensity of cement production in the Net Zero Scenario, 2015-2030 – Charts – Data & Statistics - IEA, (n.d.). <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/direct-co2-intensity-of-cement-production-in-the-net-zero-scenario-2015-2030> (accessed July 7, 2022).
- [2] 2050 Carbon Neutrality Roadmap, (n.d.). <https://cembureau.eu/library/reports/2050-carbon-neutrality-roadmap/> (accessed July 7, 2022).
- [3] R. Malheiro, A. Camões, G. Meira, J. Pinto, Durability of fly ash eco-friendly cement mortars in severe environment, *Procedia Manufacturing*. 46 (2020) 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.019>.
- [4] Z. Syahida Adnan, N.F. Ariffin, S.M. Syed Mohsin, N.H. Abdul Shukor Lim, Review paper: Performance of rice husk ash as a material for partial cement replacement in concrete, *Materials Today: Proceedings*. 48 (2021) 842–848. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.02.400>.
- [5] P. Sangeetha, M. Shanmugapriya, K. Santhosh Saravanan, P. Prabhakaran, V. Shashankar, Mechanical properties of concrete with seashell waste as partial replacement of cement and aggregate, *Materials Today: Proceedings*. 61 (2022) 320–326. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.09.501>.
- [6] LNEC E 464, E 464 - Concrete - Prescriptive methodology for a design working life of 50 and of 100 years under the environmental exposure, Lisbon, Portugal, 2007.
- [7] L. Basheer, J. Kropp, D.J. Cleland, Assessment of the durability of concrete from its permeation properties : a review, *Construction and Building Materials*. (2001) 93–103. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00058-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00058-1).
- [8] J. Liu, Q. Qiu, X. Chen, F. Xing, N. Han, Y. He, Y. Ma, Understanding the interacted mechanism between carbonation and chloride aerosol attack in ordinary Portland cement concrete, *Cement and Concrete Research*. 95 (2017) 217–225. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.032>.
- [9] J. Liu, M. Ba, Y. Du, Z. He, J. Chen, Effects of chloride ions on carbonation rate of hardened cement paste by X-ray CT techniques, *Construction and Building Materials*. 122 (2016) 619–627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.101>.
- [10] R. Malheiro, A. Camões, R.M. Ferreira, G. Meira, T. Amorim, R. Rei, Carbonation front progress in mortars containing fly ash considering the presence of chloride ions, *Key Engineering Materials*. 634 (2015). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.634.214>.
- [11] H. Kuosa, R.M. Ferreira, E. Holt, M. Leivo, E. Vesikaria, Effect of coupled deterioration by freeze–thaw, carbonation and chlorides on concrete service life, *Cement & Concrete Composites*. 47 (n.d.) 32–40. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.008>.
- [12] Y. Wang, S. Nanukuttan, Y. Bai, P.A.M. Basheer, Influence of combined carbonation and chloride ingress regimes on rate of ingress and redistribution of chlorides in concretes, *Construction and Building Materials*. 140 (2017) 173–183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.121>.
- [13] LNEC, E 390 - Determination of the resistance to chloride penetration. Immersion test., 1993.

- 
- [14] LNEC E 463, E 463 - Determination of diffusion coefficient of chlorides from non-steady-state migration test, LNEC, Lisbon, 2004.
- [15] European Committee for Standardization, EN 12390-12 Testing hardened concrete - Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method, 2020.
- [16] A. Henriques, N. Coelho, Análise comparativa dos procedimentos utilizados para o ensaio acelerado de imersão e secagem face à ação dos íões cloreto, Mestrado, Universidade do Minho, 2017.
- [17] M.V.A. Florea, H.J.H. Brouwers, Chloride binding related to hydration products Part I : Ordinary Portland Cement, Cement and Concrete Research. 42 (2012) 282–290.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.016>.
- [18] RILEM TC CPC-18, RILEM RECOMMENDATION CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth, Materials and Structures. (1988) 453–455.
- [19] LNEC E 393, E 393 - Determination of the absorption of water through capillarity, Lisbon, Portugal, 1993.
- [20] A.M. Neville, Propriedades of concrete, 2nd ed., PINI, São Paulo, 1997.
- [21] J.S. Coutinho, Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem, University of Porto, 1998.
- [22] L.J. Parrott, A Review of Carbonation in Reinforced Concrete., in: In: Shciessl, P (Ed.) Corrosion of Steel in Concrete, Cement and Concrete Association, Wexham Spring, Buckinghamshire, 1987: p. 69.
- [23] R. Malheiro, A. Camões, G. Meira, M.T. Amorim, J. Castro-gomes, R.M. Ferreira, Behaviour of cementitious matrices subjected to the combined action of chloride ions and carbonation, Revista Materia. 23 (2018). <https://doi.org/https://doi.orghttps://doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0496>.

Salvador, Brasil

9 a 11 de novembro de 2022

# 4º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS

Anais do Evento

ISBN: 978-65-00-55912-5



## Editores

Paulo Roberto Lopes Lima

Cintia Maria Ariani Fontes

Geraldo José Belmonte dos Santos

Daniel Veras Ribeiro

## .: FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de  
Construção Sustentáveis (4. : 2022 : Salvador,  
BA)  
Anais do evento 4º Congresso Luso-Brasileiro de  
Materiais de Construção Sustentáveis [livro  
eletrônico] / editores Paulo Roberto Lopes Lima...  
[et al.]. -- 1. ed. -- Feira de Santana, BA :  
Ed. dos Autores, 2022.  
PDF.

Vários autores.

Outros editores: Cintia Maria Ariani Fontes,  
Geraldo José Belmonte dos Santos, Daniel Veras  
Ribeiro.

Bibliografia.

ISBN 978-65-00-55912-5

1. Engenharia civil 2. Construção - Planejamento  
e controle 3. Construção - Projetos 4. Inovação  
tecnológica 5. Materiais de construção  
6. Sustentabilidade I. Lima, Paulo Roberto Lopes.  
II. Fontes, Cintia Maria Ariani. III. Santos,  
Geraldo José Belmonte dos. IV. Ribeiro, Daniel  
Veras.

22-134518

CDD-624

Índices para catálogo sistemático:

1. Construção civil : Engenharia 624

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129



Código de barras dos Anais