

AVALIAÇÃO DE MATRIZ CIMENTÍCIA CONTENDO CINZAS VOLANTES FRENTE À AÇÃO COMBINADA DA CARBONATAÇÃO E DOS IÕES CLORETO

Raphaele Malheiro

Investigadora
Universidade do Minho
Guimarães - Portugal
raphamalheiro@gmail.com

Aires Camões

Professor
Universidade do Minho
Guimarães - Portugal
aires@civil.uminho.pt

Gibson Meira

Professor
IFPB
João Pessoa - Brasil
gibsonmeira@yahoo.com

Rui M. Ferreira

Investigador Senior
VTT
Spoo - Finlândia
miguel.ferreira@vtt.fi

M. Teresa Amorim

Professora
Universidade do Minho
Guimarães - Portugal
mtamorim@det.uminho.pt

Rui Reis

Investigador
Universidade do Minho
Guimarães - Portugal
ruicunhareis@gmail.com

SUMÁRIO

As cinzas volantes (CV) têm sido utilizadas para tornar a matriz cimentícia mais resistente à penetração de Cl^- uma vez que tornam a estrutura porosa mais densa. Por outro lado, sabe-se que o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ existente na matriz é parcialmente consumido pelas reações pozolânicas, facilitando o avanço da carbonatação. Considerando a ação conjunta destes agentes, especula-se sobre o comportamento da matriz. Foram moldados provetes com 40% de CV (substituição). Após 90 dias de cura os provetes foram submetidos a 12 ciclos de imersão (3,5% NaCl)/secagem (4% CO_2) e 12 ciclos de referência, 168 dias. Os resultados indicam que os provetes submetidos à ação combinada apresentam uma profundidade de carbonatação inferior em relação à ação exclusiva do CO_2 . Ao contrário, apresentam um perfil de Cl^- com teores superiores quando comparados à ação exclusiva dos Cl^- .

Palavras-chave: Cinzas volantes, ação combinada, carbonatação, cloretos, durabilidade.

1. INTRODUÇÃO

Além de imprimir um caráter sustentável ao betão, a incorporação de CV em matrizes cimentícias tem sido frequentemente utilizada com objetivo de tornar a matriz mais resistente à ação dos iões cloreto. A sílica (SiO_2) presente nas CV reage com o hidróxido de

cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) do cimento formando estruturas do tipo C-S-H que diminuem a porosidade do betão e, conseqüentemente, diminuem a difusão de agentes agressores como, por exemplo, os iões cloreto (Cl^-) e o dióxido de carbono (CO_2). Além disso, os aluminatos presentes nas CV reagem quimicamente com os Cl^- fixando-os e reduzindo a quantidade de cloretos livres capazes penetrar no betão [1]. Várias pesquisas chegaram a resultados que apontam para esta direção. Jung *et al.* [2], por exemplo, estudaram misturas de betão com substituição de cimento, em massa, por 0% e 20% de CV concluindo que misturar CV ao betão é extremamente eficaz para reduzir a penetração de iões cloreto. Segundo os autores, o uso desta adição aumenta a concentração superficial de cloretos, devido à sua fixação, e diminui a quantidade de iões que penetra para o interior do betão, devido à menor porosidade. Camões *et al.* [3], também verificaram reduções no coeficiente de difusão de cloretos em betões com misturas que continham 20%, 40% e 60% de CV em substituição do cimento.

Entretanto, no que diz respeito à carbonatação, quando se fala em adição de CV por substituição ao cimento, existe um efeito duplo resultante do emprego destas adições. Se, por um lado, a redução da permeabilidade diminui a penetração do CO_2 na estrutura, por outro, as reações pozolânicas, e o conseqüente consumo de hidróxido de cálcio, diminuem a reserva alcalina do betão, podendo daí resultar uma frente de carbonatação mais rápida quando comparada aos betões sem adição [4, 5, 6].

A ação de cada um destes agentes de degradação, Cl^- e CO_2 , de forma isolada, tem sido bastante investigada. No entanto, o estudo sobre a combinação de mecanismos de degradação alcança maior expressividade apenas a partir do ano 2000 [7, 8, 9, 10]. Assim, apesar da ação combinada destes agentes 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 maioria dos estudos sobre o assunto em questão incide sobre o efeito da carbonatação na penetração de cloretos em matrizes cimentícias. De acordo com Basheer *et al.* [11], em casos extremos, a taxa de corrosão em estruturas reais, devido à ação dos Cl^- , pode chegar aos 5 mm/ano e, devido à carbonatação, pode chegar aos 0,05 mm/ano. Desta forma, devido ao caráter supostamente secundário que a carbonatação assume dentro da ação combinada com os Cl^- , são muito poucas as investigações que procuram compreender o efeito da ação dos Cl^- sobre a carbonatação de matrizes cimentícias.

Sobre a penetração de cloretos em matrizes contendo CV, recentemente, em sua pesquisa experimental, Chengfang *et al.* [12] concluíram que quanto maior o período de carbonatação, maior também é o coeficiente de difusão de cloretos. Este efeito é mais significativo para betões com CV, até 30%, uma vez que com a adição de CV, o clínquer é reduzido e, conseqüentemente, a capacidade do betão em absorver CO_2 , o que facilita o avanço da carbonatação. Na mesma linha de raciocínio, e utilizando ensaios cíclicos, Jung *et al.* [2] concluíram que a penetração de cloretos é mais pronunciada quando combinada com a

ação da carbonatação do que quando ocorre de maneira isolada. No caso do betão com CV, a concentração de cloretos tende a ser extremamente alta até certo ponto, aproximadamente 1 cm de profundidade, mas, depois, cai subitamente. Provavelmente devido à diferença entre a microestrutura do betão carbonatado e não carbonatado com CV. No sentido contrário, e como resultado da realização de ensaios cíclicos, Backus *et al.* [13] afirmam que a combinação da carbonatação com o ingresso de cloretos pode agir reduzindo a penetração dos cloretos no betão, com e sem CV, porém, de maneira pouco significativa. No entanto, a falta de padronização sobre os diferentes parâmetros envolvidos nos ensaios utilizados nas diferentes pesquisas, tais como o tipo de ensaio, a temperatura, a humidade e a concentração de NaCl e CO₂ dificulta a comparação entre resultados.

De forma a contribuir para esta importante e atual discussão, este trabalho experimental estuda o efeito da ação combinada dos iões cloreto e da carbonatação sobre matriz cimentícia contendo CV, através de ensaios acelerados (cíclicos).

2. METODOLOGIA

2.1 Preparação dos provetes

Foram moldados provetes em argamassa, cúbicos, nas dimensões 50x50x50mm³, utilizando cimento Portland (CEM I 42,5R), CV proveniente da Central Termoelétrica de Sines, (substituição de 40% em massa) e relação água/ligante 0,52. Utilizou-se uma areia comum de rio com módulo de finura igual a 2,77 e diâmetro máximo característico igual a 4mm. A composição química do cimento utilizado é apresentada no Quadro 1. Já a composição química e algumas propriedades físicas das CV podem ser vistas no Quadro 2. A composição das argamassas e algumas características podem ser vistas no Quadro 3.

Quadro 1: Composição química do cimento Portland

SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	FeO ₃ [%]	CaO [%]	MgO [%]	SO ₃ [%]	K ₂ O [%]	Na ₂ O [%]	Resíduo insolúvel [%]	Perda ao fogo [%]
19,65	4,28	3,35	61,35	1,7	3,36	0,89	0,19	1,7	2,82

Quadro 2: Composição química e propriedades físicas das cinzas volantes

SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	FeO ₃ [%]	CaO [%]	MgO [%]	SO ₃ [%]	K ₂ O [%]	Na ₂ O [%]	Finura (d>45,1µm) [%]	Dens. [kg/m ³]	I.A. _{28D} [%]	I.A. _{90D} [%]	Perda ao fogo [%]
40,87	22,72	6,81	1,97	1,18	1,08	2,78	0,82	17,92	2349	79,5	97,5	5,6

Quadro 3: Composição e propriedades das argamassas

Material e propriedades	Argamassa com 40% CV
Ligante: areia [kg]	1:3
Espalhamento [mm]	190
Resistência à compressão [MPa] – 28/ 90 dias	23,6 (0,1)*/ 44,60 (0,16)*

*Desvio padrão

Depois de moldados, os provetes foram cobertos com uma película plástica e estiveram 24 horas em ambiente controlado (21 °C e 98% HR). Em seguida, foram removidos dos moldes e permaneceram em água por 90 dias. A escolha do período de cura está relacionada com as reações pozolânicas que ocorrem nos provetes contendo CV.

Finalizado o período de cura, todas as faces de cada provete foram isoladas com pintura bi-componente de base epóxi, exceto aquela através da qual se pretendia que houvesse a penetração dos agentes agressores. Este processo demorou 3 dias: no primeiro dia a pintura funcionou como um *primer*; no segundo dia os poros foram efetivamente cobertos; no terceiro dia os poros que ainda não estavam completamente cobertos foram identificados e o epóxi foi novamente aplicado mas, desta vez, incidindo diretamente sobre estes poros. Concluída a pintura, os provetes estiveram em processo de secagem por 4 dias em ambiente de laboratório (21°C e 60% HR).

2.2 Ensaios cíclicos

Depois de concluída a preparação dos provetes, a fim de simular a ação combinada dos iões cloreto e da carbonatação, os provetes foram submetidos a ciclos de imersão/secagem durante 168 dias. Parte dos provetes moldados foi submetida ao ciclo combinado - ciclo A (Cl⁻/CO₂): 2 dias em solução contendo NaCl (concentração igual a 3,5% massa) e 12 dias em câmara de carbonatação com base em CEN/TS 12390-12 [14]. A outra parte foi submetida aos ciclos de referência - ciclo B (Cl⁻/O₂): 2 dias na mesma solução de NaCl e 12 dias em ambiente de laboratório; e ciclo C (H₂O/CO₂): 2 dias em água e 12 dias em câmara de carbonatação (Fig. 1).

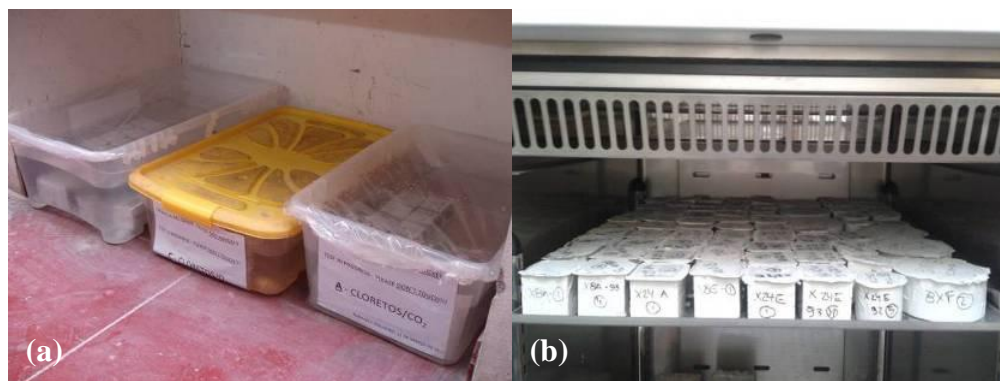


Figura 1. (a) Imersão em solução contendo cloretos e em água; (b) Secagem em câmara de carbonatação.

Após o período de exposição, a penetração de cloretos e de CO_2 foram avaliadas. No caso dos cloretos, foram avaliados os 30 primeiros milímetros do provete, através de um perfil de cloretos, que foi traçado com amostras de espessuras de 5 mm. O perfil foi traçado utilizando o teor total de cloretos em função da massa da amostra. A sua determinação foi realizada com base no procedimento RILEM TC 178-TMC [15].

No caso do CO_2 , determinou-se a profundidade da frente de carbonatação. Esta profundidade foi determinada com o auxílio de um indicador químico colorimétrico, a solução de fenolftaleína. A solução de fenolftaleína, com uma concentração de 1%, dissolvida em álcool etílico é incolor em pH inferior a 8,3 (situação de carbonatação), para valores superiores a 9,5 torna-se vermelho-carmim e entre 8,3 e 9,5 apresenta uma coloração variável entre rosa e vermelho carmim [16]. Para isso, os provetes foram partidos perpendicularmente à direção da penetração do CO_2 . Depois, as superfícies fraturadas foram pulverizadas com fenolftaleína e, em seguida, a profundidade de carbonatação foi determinada de acordo com o método descrito no procedimento RILEM CPC-18 [17].

Ensaio complementares como absorção capilar de água [18] e permeabilidade ao oxigénio também foram realizados [19].

3. RESULTADOS

3.1 Ciclos de imersão e secagem

3.1.1 Profundidade de carbonatação

O Quadro 4 mostra as profundidades de carbonatação médias obtidas após os ciclos de imersão/secagem para as situações estudadas, bem como a respetiva dispersão dos resultados. Os valores de profundidade apresentados equivalem à média de três provetes.

Quadro 4: Profundidades de carbonatação média obtidas após 90 dias de cura e 168 dias de ensaio (12 ciclos).

Situação	Profundidade de carbonatação [mm]	Dispersão [%]
A (Cl ⁻ /CO ₂)	13,47	0,50
C (H ₂ O/CO ₂)	18,30	0,69

O Quadro 4 deixa claro a influência da presença de cloretos sobre a evolução da frente de carbonatação. Observa-se uma redução aproximada de 27% na profundidade de carbonatação dos provetes submetidos à ação combinada dos agentes agressores, ciclo A, quando comparada à profundidade obtida para os provetes submetidos exclusivamente à penetração de CO₂, ciclo C.

3.1.2 Perfis de cloretos

A Fig. 2 mostra os perfis de cloretos obtidos após os ciclos de imersão/secagem para as situações estudadas. Cada ponto do perfil equivale à média de duas amostras analisadas. A profundidade de carbonatação está indicada no perfil de cloretos a fim de facilitar a análise dos resultados.

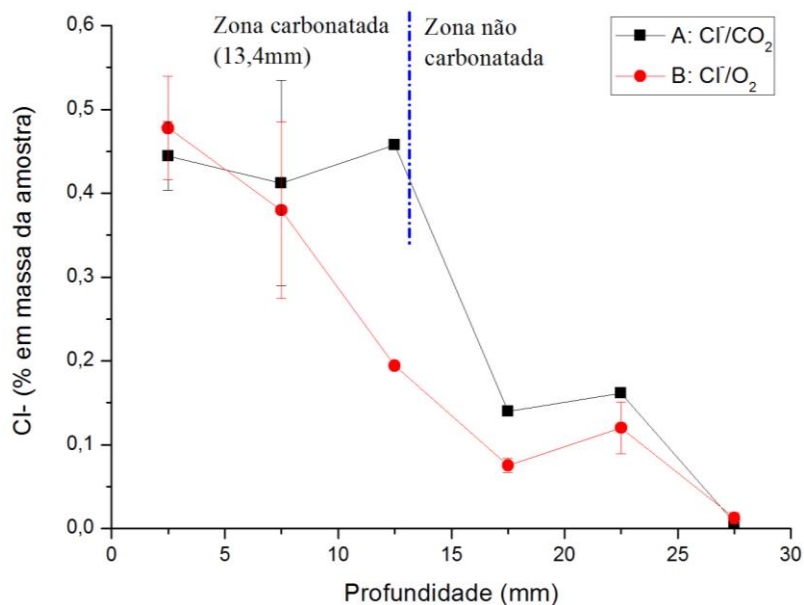


Figura 2 Perfis de cloreto obtidos após 90 dias de cura e 168 dias de ensaio (12 ciclos).

A diferença entre os perfis de cloreto mostrados acima deixa claro que a carbonatação exerce alguma influência sobre a penetração de cloretos em argamassas contendo CV. Nos provetes submetidos à ação combinada dos agentes agressores, ciclo A, a concentração de cloretos varia pouco na zona carbonatada, diferente do que acontece para os provetes não carbonatados, ciclo B, onde o decréscimo no teor de cloretos acontece, gradualmente,

desde o início do perfil. A redução no teor de cloretos para o ciclo A acontece de maneira brusca, logo após um pico de cloretos localizado próximo ao final da zona carbonatada.

No que diz respeito à concentração superficial de cloretos, os valores são bastante similares para as duas situações estudadas sendo que, o perfil relativo ao ciclo B, apresenta um valor médio um pouco superior ao ciclo A

3.2 Ensaio complementares

Os valores apresentados para os ensaios abaixo equivalem à média de três provetes estudados. Nestes casos, além dos ensaios cíclicos, optou-se por estudar, também, uma situação de referência onde os provetes estiveram expostos ao ambiente de laboratório durante 168 dias e, em seguida, foram ensaiados.

3.2.1 Absorção capilar de água

A Fig. 3 mostra as curvas de absorção capilar obtidas para as situações estudadas.

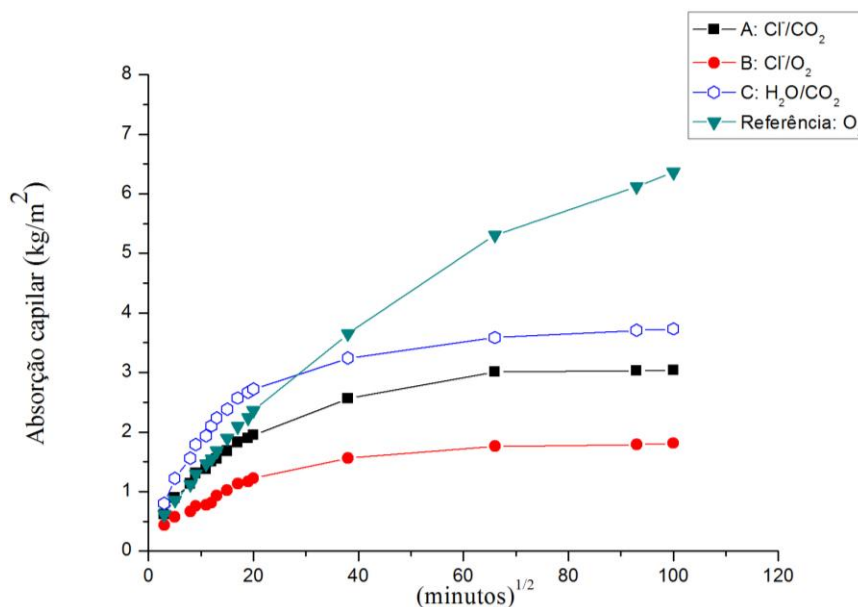


Figura 3. Cinética de absorção capilar obtida após 168 dias de ensaio.

Com base nas curvas apresentadas nas Fig. 3 recorreu-se ao método dos mínimos quadráticos para calcular o coeficiente de absorção capilar (S) no tempo tendo em conta os resultados obtidos durante as primeiras 4 horas de ensaio, período este considerado de absorção capilar dos poros de maior diâmetro [20] que funcionam como caminho privilegiado para a penetração de líquidos. Estes valores são apresentados na Quadro 5, bem como o respetivo coeficiente de correlação linear, R².

Quadro 5: Coeficiente de absorção capilar.

Período de ensaio [dias]	Situação	S [kg/m ² /(min) ^{1/2}]	R ² [%]
168	A (Cl ⁻ /CO ₂)	0,087	97,40
	B (Cl ⁻ /O ₂)	0,045	96,20
	C (H ₂ O/CO ₂)	0,131	98,07
	Referência	0,105	99,68

As curvas apresentadas acima mostram um desenvolvimento esperado, com inclinação decrescente ao longo do tempo. De maneira geral, estas curvas encontram-se bem distintas umas das outras, evidenciando uma grande diferença de absorção entre os provetes submetidos à situações onde há cloretos, ciclos A e B, e as demais situações. Os coeficientes de absorção capilar apresentados confirmam esta afirmação. Além disso, analisando os coeficientes obtidos observa-se que, apesar de similares, o coeficiente obtido para os provetes sujeitos à ação do CO₂ é um pouco superior ao obtido para a situação de referência.

3.2.2 Permeabilidade ao oxigénio

A Fig. 4 mostra os valores de permeabilidade ao oxigénio obtidos para as situações estudadas.

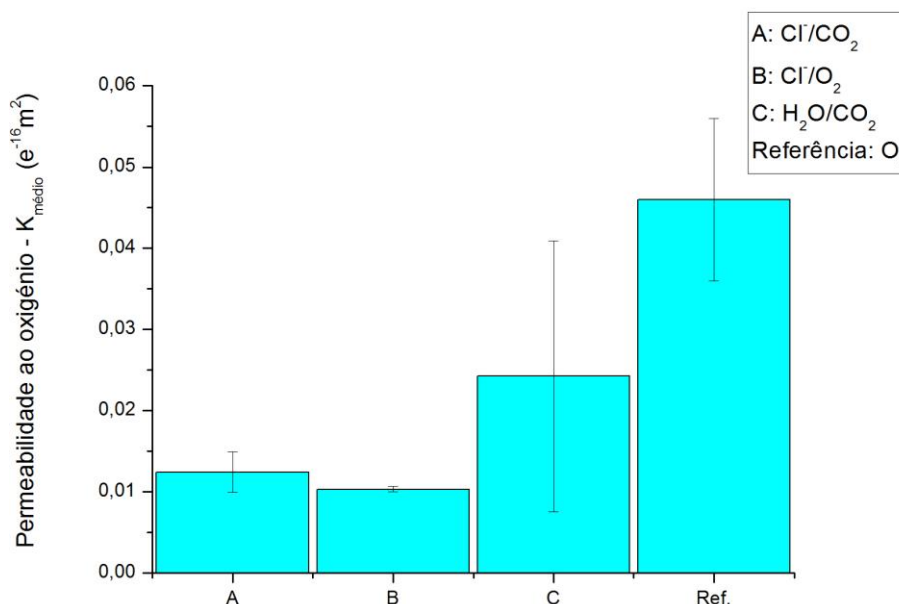


Figura 4. Valores médios obtidos para permeabilidade ao oxigénio após 168 dias de ensaio. Analisando a Fig. 4 é possível observar que há uma redução nos valores da permeabilidade ao oxigénio quando se comparam os valores obtidos para os provetes submetidos à

situação de referência com aqueles obtidos para os provetes expostos aos agentes agressores. Observa-se também que as situações onde há a presença de iões cloreto, ciclos A e B, são aquelas que apresentam os menores valores de permeabilidade ao oxigénio.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Influência da penetração de cloretos sobre a carbonatação em matriz de cimento contendo CV

As diferenças de valores de profundidade de carbonatação apresentadas no Quadro 4 deixam claro que a evolução da frente de carbonatação é influenciada pela presença de iões cloreto. Para as condições estudadas, há uma tendência para a redução da profundidade de carbonatação nas situações onde as argamassas foram submetidas, de maneira combinada, ao CO_2 e aos Cl^- . Este resultado coincide com os resultados encontrados por Leivo *et al.* [21]. Estes autores estudaram o efeito da penetração de cloretos sobre a carbonatação, utilizando difusão de cloretos por migração, e concluíram que a carbonatação em presença de cloretos resultou, em geral, em menores profundidades de carbonatação.

Uma das explicações para esta redução na profundidade de carbonatação pode estar relacionada com a alteração sofrida em propriedades da argamassa que são consideradas importantes para o processo de carbonatação, tais como, absorção capilar e permeabilidade ao oxigénio [11]. O Quadro 5 e a Fig. 4 mostram que também há uma tendência para redução destes parâmetros nas argamassas submetidas à ação combinada dos agentes agressores, ciclo A, quando comparadas àquelas submetidas apenas à ação do CO_2 , ciclo C. A redução destes parâmetros indicia uma alteração da estrutura porosa da matriz estudada, muito possivelmente devido a uma colmatação parcial dos poros, fato que dificulta a penetração do agente agressor e, conseqüentemente, reduz a profundidade de carbonatação.

Outra justificativa para a redução na profundidade de carbonatação pode estar relacionada com a capacidade do sal em bloquear fisicamente os poros da matriz e, conseqüentemente, dificultar a penetração do agente agressor. Na tentativa de verificar a presença de sal na fase de secagem dos provetes submetidos à ação combinada do CO_2 e Cl^- , optou-se por produzir imagens de microscópio ótico em alguns dos provetes estudados (Fig. 5).

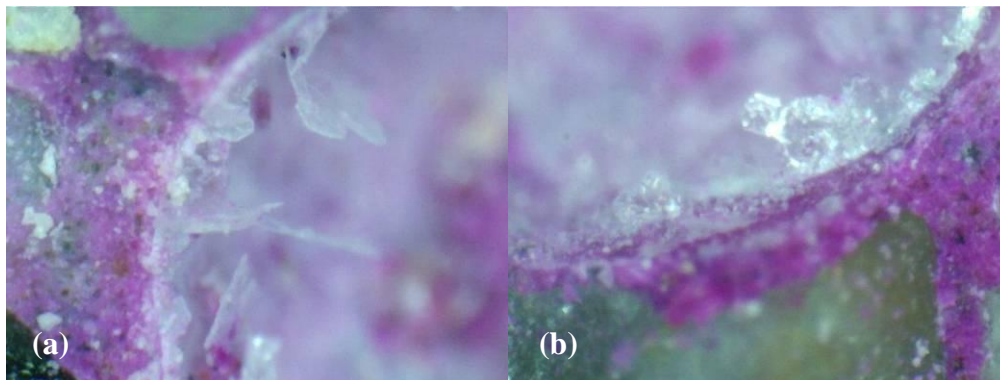


Figura 5. (a) (b) Imagens de microscópio ótico (400x) de provetes submetidos à ação combinada em região não carbonatada.

Na Fig. 5 é possível verificar a existência de uma estrutura cristalina junto à parede dos poros. Esta estrutura pode estar relacionada com a precipitação (solubilidade do NaCl, H₂O, 25 °C, é 36,9g/100ml) do sal após a evaporação da água da solução durante a fase de secagem do provete (12 dias) fato que corrobora a ideia de bloqueio dos poros da matriz.

4.2 Influência da carbonatação sobre a penetração de cloretos em matriz de cimento contendo CV

As diferenças entre os perfis de cloretos apresentados nas Fig. 2 deixam claro que há influência da carbonatação sobre a penetração de cloretos para as argamassas estudadas. Neste caso, a carbonatação age "estabilizando", em valores relativamente altos, a quantidade total de cloretos em toda a zona carbonatada. Em seguida, acontece uma brusca redução no teor de cloretos, que se verifica logo após um pico de cloretos localizado próximo à interface entre a zona carbonatada e a zona não carbonatada das amostras. Apesar desta redução, os teores de cloretos apresentados pelas amostras submetidas à ação combinada dos agentes agressores, ciclo A, conseguem ser superiores, durante quase todo o perfil, àqueles apresentados para as amostras submetidas apenas a ação dos cloretos, ciclo B.

Os coeficientes de absorção capilar apresentados no Quadro 5, importante parâmetro para análise dos ensaios de imersão/secagem uma vez que neste ensaio a absorção capilar é o principal mecanismo de transporte de cloretos, corroboram os resultados obtidos para os perfis de cloreto uma vez que as amostras submetidas à ação combinada, ciclo A, apresentam valores mais altos do que aqueles obtidos para amostras submetidas à ação exclusiva dos iões cloreto, ciclo B.

4.3 Carbonatação, CV e cloretos livres

Se, por um lado, a carbonatação promove uma alteração microestrutural que torna os poros mais densos [23] e dificulta a penetração de cloretos, por outro, liberta os cloretos anteriormente combinados aumentando, conseqüentemente, a quantidade de cloretos livres

que são os que realmente contribuem para a deterioração das estruturas de betão armado [24].

Uma das maneiras possíveis de encontrar iões cloreto no interior do betão é em forma de sal de Friedel, resultado da combinação entre cloretos e aluminato tricálcio. Entretanto, pesquisas apontam para o aumento da solubilidade do sal de Friedel com o aumento do grau de carbonatação [23] uma vez que a sua estabilidade está relacionada ao pH da solução [25].

Assim como a carbonatação, a adição de CV também tem um papel ambíguo na difusão de cloretos em ambiente contendo CO_2 . Por um lado, as partículas de CV reagem com o hidróxido de cálcio originando produtos cimentícios que diminuem fortemente a porosidade do betão e dificultam a penetração de cloretos. Além disso, os aluminatos presentes nas CV reagem quimicamente com os iões de cloreto fixando-os e reduzindo a quantidade de cloretos livres capazes penetrar no betão [1]. Por outro lado, a adição de CV favorece o desenvolvimento da carbonatação, uma vez que as reações pozolânicas provenientes desta adição consomem parte do hidróxido de cálcio disponível para carbonatação, e, conseqüentemente, aumenta a quantidade de cloretos livres, uma vez que a carbonatação liberta parte dos cloretos fixos.

Na verdade, parece haver uma verdadeira "disputa" entre a densificação dos poros e o aumento da quantidade de cloretos livres. Para o caso em estudo, o aumento na quantidade de cloretos livres parece ter "vencido a disputa".

Tendo em conta que pesquisas recentes apontam para uma redução na quantidade de cloretos totais, provocada pela carbonatação, ao longo da profundidade de amostras cimentícias sem CV [26], estas cinzas têm um papel fundamental no resultado alcançado nesta pesquisa uma vez que, neste caso, ao contrário do esperado para amostras sem CV, a carbonatação provoca um aumento na quantidade de cloretos totais ao longo da profundidade das amostras estudadas. Montemor *et al.* [27] estudando a corrosão em argamassas com CV expostas ao CO_2 e aos Cl^- , chegaram a conclusão semelhante ao utilizarem 30% CV em substituição ao cimento.

Este resultado chama atenção para a utilização de CV em substituição ao cimento em construções situadas em ambiente de agressividade marinha que possam sofrer forte influência do CO_2 tais como portos, pontes e viadutos.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho, é possível chegar a algumas conclusões. Entretanto, as conclusões que se seguem não devem ser tomadas de maneira absoluta, pois se referem aos materiais investigados neste trabalho e aos ensaios acelerados aqui utilizados, os quais formam um ambiente diferente do cenário real e com uma dinâmica própria. Desta maneira, pode-se concluir que:

- O avanço da frente de carbonatação e a penetração de cloretos em argamassas com CV são afetados pela ação combinada dos agentes agressores em causa, CO_2 e Cl^- ;
- Há uma tendência para redução da profundidade de carbonatação na presença de cloretos;
- Havendo carbonatação, há também uma tendência para estabilização do teor de cloretos em valores relativamente elevados em toda a zona carbonatada, havendo, logo após esta zona, uma redução do teor de cloretos que, mesmo assim, se mantém acima dos valores obtidos para as argamassas submetidas à ação exclusiva dos Cl^- ;
- O aumento na quantidade de cloretos livres causado pela carbonatação e incrementado, de maneira decisiva, pela adição de CV, parece ter sido o principal motivo para elevação no teor de cloretos;
- Especial atenção deve ser dada às estruturas de betão armado situadas em zonas de agressividade marinha onde possa haver forte influência do CO_2 aquando da utilização de CV para a composição do betão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo apoio a esta pesquisa. Os autores também agradecem à SECIL por disponibilizar o cimento utilizado.

REFERÊNCIAS

- [1] Camões, A.; Rocha, P.; Aguiar, B.; Jalali, S.; Delgado, R. - "Contribuição da adição de cinzas volantes para a durabilidade do betão" BE2002, Encontro Nacional Betão Estrutural 2002, LNEC, Lisboa, Portugal, 27- 29.11. 2002, p. 113-122.
- [2] Jung, S.; Choi, Y.; Lee, B. - "Influence of carbonation on the chloride diffusion in concrete" em SB07 Seoul: Proceedings of the International Conference on Sustainable Building Asia, Seoul, Korea, 2007.
- [3] Camões, A.; Rocha, P.; Delgado, R.; Jalali, S.; Aguiar, B. - "Influência das cinzas volantes no desempenho dos betões" BE2000, Encontro Nacional Betão Estrutural 2000, Porto, Portugal, 22- 24.11. 2000.
- [4] Neville, A. M. - *Propriedades do Concreto*. Pini, 2ª ed. São Paulo, 1997, 828p.
- [5] Vaghetti, A. O. - "Efeitos da cinza volante com cinza da casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland", Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999, 111p.
- [6] Sperb, J.E.K. - "Carbonatação e absorção capilar de concretos com adições minerais e ativadores químicos", Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003, 103p.

- [7] Costa, A.; Appleton, J. - "Concrete carbonation and chloride penetration in a marine environment", *Concrete Science and Engineering*, 2001, 3, 242-249.
- [8] Chindaprasirt, P.; Rukzon, S.; Sirivivatnanon, V. - "Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended Portland cement mortar", *Construction and Building Materials*, 2008, 22, 1701-1707.
- [9] Malheiro, R.; Camões, A.; Ferreira, R.M.; Meira, G.; Amorim, T. - "Effect of carbonation on the chloride diffusion of mortar specimens exposed to cyclic wetting and drying", *XII International Conference on Durability of Building, Materials and Components*, São Paulo, Brazil, 2014, p. 482-489.
- [10] Ramezaniyanpour, A. A.; Ghahari, S. A.; Esmaeili, M. - "Effect of combined carbonation and chloride ion ingress by an accelerated test method on microscopic and mechanical properties of concrete", *Construction and Building Materials*, 2014, 58, 138-146.
- [11] Basheer, L.; Kropfb, U.; Clelandc D. - "Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review", *Construction and Building Materials*, 2001, v.15, p. 93-103.
- [12] Chengfang, Y.; Ditao, N.; Daming, L. - "Effect of carbonation on chloride diffusion in fly ash concrete", *Disaster Advances*, 2012, 5 (4).
- [13] Backus, J.; McPolin, D.; Holmes, N.; Long, A. - "Combined chloride and carbon dioxide ingress in concrete exposed to cyclic wetting and drying", *Civil Engineering Research Association of Ireland. CERAI*. Belfast, 28-29.08.2014.
- [14] CEN/TS 12390-12. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Testing hardened concrete - Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method. Brussels, 2010.
- [15] RILEM TC 178-TMC. REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX. TESTING AND MODELLING CHLORIDE PENETRATION IN CONCRETE: Analysis of total chloride content in concrete, 2002.
- [16] Andrade, C. - *Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras*. Pini, São Paulo, 1992.
- [17] RILEM CPC-18. REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX. 'Measurement of hardened concrete carbonation depth'. Materials and Structures, 1988.
- [18] LNEC E 393. LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade. Lisboa, 1993.
- [19] LNEC E 392. LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. Betões. Determinação da permeabilidade ao oxigénio. Lisboa, 1993.

- [20] Coutinho, J. S. - "Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem", Doutoramento, Universidade do Porto, Porto, 1998.
- [21] Leivo, M.; Sistonen, E.; Al-Nesawy, F.; Piironen, J.; Kuosa, H.; Holt, E.; Koskinen, P.; Nordqvist, C. - "Effect of interacted deterioration parameters on service life of concrete structures in cold environments". Laboratory test results 2009 - 2011. VTT Technical Research Centre of Finland, Research Report VTT-R-09119-11, 2011.
- [22] Pauletti, C. - "Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação", Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004, 176p.
- [23] Ihekwha, N. M.; Hope, B.B.; Hansson, C.M. - "Carbonation and electrochemical chloride extraction from concrete", *Cement and Concrete Research*, 1996, v.26, n.7, p. 1095-1107.
- [24] Mohammed, T. U.; Hamada, H. - "Relationship Between Free Chloride and Total Chloride Contents in Concrete", *Cement and Concrete Research*, 2003, v. 33, p. 1487-1490.
- [25] Sryavanshi, A. K.; Swamy, R. N. - "Stability of friedel's salt in carbonated concrete structural elements", *Cement and Concrete Research*, 1996, v.26, n.5, p.729-741.
- [26] Malheiro, R.; Camões, A.; Ferreira, R.M.; Meira, G.; Amorim, T.; Reis R. - "Influência da carbonatação no transporte de cloretos em argamassas submetidas à ação combinada destes dois agentes", *1º Congresso Luso Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis*, Guimarães, Portugal, 2014, p.479-487.
- [27] Montemor, M.F.; Cunha, M.P.; Ferreira, M.G.; Simões, A.M. - "Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides", *Cement and Concrete Composites*, 2002, 24, 45-53.