

O EFEITO DA ADIÇÃO DE 40% DE CINZAS VOLANTES SOBRE O INGRESSO DE CLORETOS NO BETÃO FACE À AÇÃO COMBINADA ENTRE A CARBONATAÇÃO E OS IÕES CLORETO

R. MALHEIRO

Investigadora
CTAC – Universidade do Minho
Guimarães; Portugal
raphamalheiro@gmail.com

A. CAMÕES

Prof. Engenheira Civil
CTAC – Universidade do Minho
Guimarães; Portugal
aires@civil.uminho.pt

G. MEIRA

Prof. Construção de Edifícios
IFPB
João Pessoa; Brasil
gibsonmeira@yahoo.com

R.M. FERREIRA

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

M.T. AMORIM

Profª Engenharia Têxtil
Universidade do Minho
Guimarães; Portugal
mtamorim@det.uminho.pt

R. REIS

Investigador
CTAC – Universidade do Minho
Guimarães; Portugal
ruicunhareis@gmail.com

RESUMO

Além de imprimir um caráter sustentável ao betão, as cinzas volantes (CV) têm sido bastante utilizadas para tornar a matriz cimentícia mais resistente à penetração de Cl^- uma vez que tornam a estrutura porosa mais densa e ajudam a fixar Cl^- . 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 e, conseqüentemente, aumentando a quantidade de Cl^- livres. Considerando a ação conjunta destes agentes, especula-se sobre o papel das CV na penetração de Cl^- . Foram moldados provetes com 0% e 40% de CV. Após 90 dias de cura os provetes foram submetidos a 12 ciclos de imersão em solução com NaCl e secagem em câmara de carbonatação, num total de 168 dias. Observou-se que os provetes contendo CV, e submetidos à ação combinada, apresentaram perfis de Cl^- com teores superiores quando comparados à ação exclusiva dos Cl^- .

1. INTRODUÇÃO

Para assegurar a sustentabilidade das estruturas de betão armado é fundamental garantir a sua durabilidade. Entretanto, o que se tem constatado nos últimos anos em todo mundo é uma degradação precoce destas estruturas. Tal fato envolve prejuízos financeiros na ordem de milhões de euros [1] para reparação e reconstrução das estruturas, além de prejuízos ambientais e sociais incalculáveis. Além disso, a fim de tornar as estruturas de betão mais sustentáveis desde a fase de conceção, tem sido cada vez mais comum a incorporação de resíduos ou subprodutos industriais à sua composição. Neste contexto, conhecer o modo como estas estruturas reagem à ação dos agentes agressores assume grande importância.

Além de imprimir um caráter sustentável ao betão, a incorporação de CV em matrizes cimentícias tem sido frequentemente utilizada com o 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 o transporte 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 [2]. Várias pesquisas chegaram a resultados que apontam para esta direção. Jung *et al.* [3], 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.* [4], 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 Ca(OH)_2 , diminuem a reserva alcalina do betão, podendo daí resultar uma frente de carbonatação com avanço mais rápido quando comparada aos betões sem adição [5, 6, 7].

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 [8, 9, 10, 11].

Sobre a penetração de cloretos em matrizes contendo CV, recentemente, em sua pesquisa experimental, Chengfang *et al.* [12] concluíram que, quando há carbonatação, 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 absorver CO_2 , o que facilita o avanço da carbonatação. Na mesma linha de raciocínio, e utilizando ensaios cíclicos, Jung *et al.* [3] 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 CO_2 dificulta a comparação de resultados.

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

2. CAMPANHA EXPERIMENTAL

2.1 Preparação dos provetes de argamassa

Foram moldados provetes em argamassa, cúbicos, nas dimensões $50 \times 50 \times 50 \text{mm}^3$. Foi utilizada areia comum de rio com módulo de finura igual a 2,77 e diâmetro máximo característico igual a 4mm. O cimento utilizado foi o CEM I 42,5R, cuja composição química pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do cimento Portland

SiO_2 [%]	Al_2O_3 [%]	FeO_3 [%]	CaO [%]	MgO [%]	SO_3 [%]	K_2O [%]	Na_2O [%]	Resíduo insolúvel [%]	Perda ao fogo [%]
19,65	4,28	3,35	61,35	1,70	3,36	0,89	0,19	1,70	2,82

Com relação às CV, foram utilizadas duas percentagens: 0% (referência) e 40% (substituição em massa). Na tentativa de garantir a uniformidade da trabalhabilidade da mistura, tanto as argamassas de referência quanto as com CV foram preparadas de maneira a fixar a consistência em valores entre os 18 e os 19 cm. Desta forma, a relação água/ligante esteve sempre próxima dos 0,56 para argamassas de referência e 0,52 para aquelas com CV. A composição química e algumas propriedades físicas destas CV podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química e propriedades físicas das CV provenientes da Central Termoelétrica de Sines

SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	FeO ₃ [%]	CaO [%]	MgO [%]	SO ₃ [%]	K ₂ O [%]	Na ₂ O [%]	Finura (d>45µm) [%]	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	79,50	97,50	5,60

Já a composição das argamassas e a resistência à compressão podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição e resistência à compressão

Material e propriedades	Argamassa sem CV (referência)	Argamassa com 40% CV
Ligante: areia [kg]	1:3	1:3
Resistência à compressão [MPa] – 28/ 90 dias	37,6 (3,9)*/ 39,1 (2,2)*	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 tardias 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 Realização do ensaio acelerado: ciclos de imersão e secagem

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 (20°C, 55%HR e 4%CO₂) com base em CEN/TS 12390-12 [14] (Fig. 1). A outra parte foi submetida ao ciclo de referência - ciclo B (Cl⁻/O₂): 2 dias na mesma solução de NaCl e 12 dias em ambiente de laboratório (21°C e 60%HR).

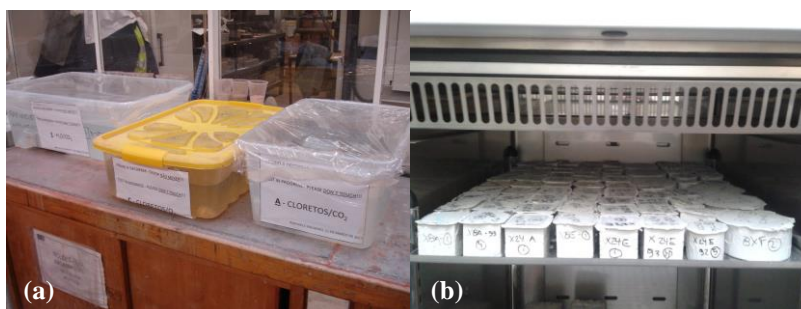


Figura 1: (a) Imersão em solução contendo cloretos e em água; (b) Secagem em câmara de carbonatação.

Terminado o período de exposição, a penetração de Cl⁻ foi avaliada para os ciclos A(Cl⁻/CO₂) e B(Cl⁻/O₂). Já a penetração de CO₂ foi avaliada apenas para o ciclo A(Cl⁻/CO₂).

No caso dos Cl⁻, foi traçado um perfil, a partir da análise de amostras em pó retiradas a cada 5 mm de profundidade até atingir os 30 primeiros milímetros do provete. O perfil foi traçado utilizando o teor total de cloretos de cada amostra em função da sua massa. A determinação deste teor foi realizada com base no procedimento RILEM TC 178-TMC [15].

No caso do CO₂, 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 CO₂. 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].

2.3 Ensaio complementar

A fim de auxiliar durante a interpretação dos resultados obtidos para o ensaio acelerado de imersão e secagem, optou-se por realizar o ensaio de absorção de água por capilaridade de acordo com a especificação LNEC E393 [18]. Este ensaio foi escolhido porque o coeficiente de absorção capilar representa um importante parâmetro para análise dos ensaios de imersão e secagem uma vez que, neste ensaio, a absorção capilar é o principal mecanismo de transporte de cloretos.

Os provetes utilizados para este teste estiveram sob as mesmas condições que os provetes utilizados para os ensaios de imersão e secagem, ou seja, em resumo, cura em água de 90 dias, pintura epóxi e 168 dias de ensaio.

3. RESULTADOS OBTIDOS

3.1 Ciclos de imersão e secagem

As Figuras 2-3 representam os perfis de cloretos obtidos após o ensaio de imersão e secagem. Cada ponto do perfil equivale a um valor médio de duas amostras analisadas. A profundidade de carbonatação está indicada no perfil a fim de facilitar a análise dos resultados e equivale à média do resultado de 3 provetes. A Figura 2 representa o perfil de cloretos obtido para as amostras com 0% de CV, que estiveram 90 dias em cura e 168 dias em ensaio.

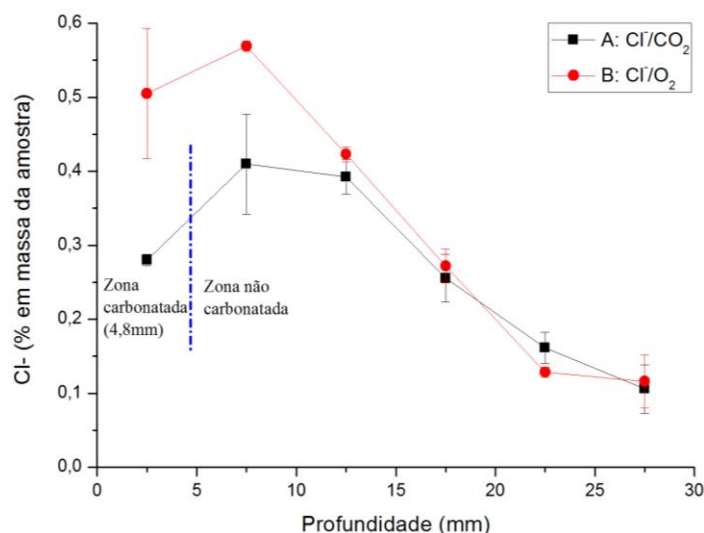


Figura 2: Perfis de cloretos para amostras de argamassa contendo 0% CV, após 168 dias de ensaio.

Já a Figura 3 representa o perfil de cloretos obtido para as amostras com 40% de CV, que estiveram 90 dias em cura e 168 dias em ensaio.

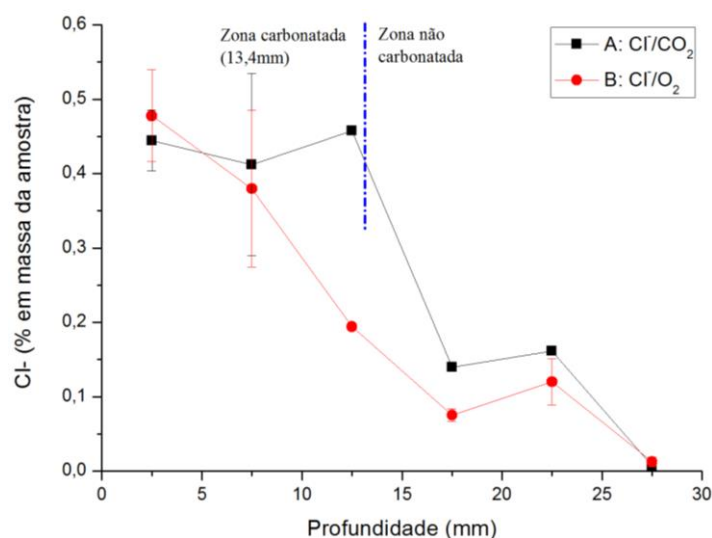


Figura 3: Perfis de cloretos para amostras de argamassa contendo 40% CV, após 168 dias de ensaio.

A diferença entre os perfis de cloretos mostrados acima deixa claro que a carbonatação exerce alguma influência sobre a penetração de cloretos tanto nas misturas que contém CV (40%) quanto naquelas que não contém.

No caso dos provetes sem CV, observam-se perfis de cloretos com um comportamento similar ao longo de todo o perfil porém com concentrações de cloretos mais elevadas para os provetes submetidos à ação exclusiva dos Cl^- , ciclo B (Cl^-/O_2), principalmente na parte inicial do perfil, ou seja, na parte mais externa da argamassa.

Já no caso dos provetes com CV (40%), o comportamento dos perfis de cloreto é mais diferenciado. Nos provetes submetidos à ação combinada dos agentes agressores, ciclo A (Cl^-/CO_2), a concentração de cloretos varia pouco na zona carbonatada e a redução no teor de cloretos acontece de maneira brusca, logo após um pico de cloretos localizado próximo ao final da zona carbonatada. Ao contrário, no ciclo B, o decréscimo no teor de cloretos acontece, gradualmente, desde o início do perfil. No que diz respeito à concentração de cloretos à profundidade mais próxima da superfície testada, 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 Ensaios complementares

A Figura 4 mostra as curvas de absorção capilar obtidas para as situações estudadas. Cada ponto da curva equivale a um valor médio de três provetes.

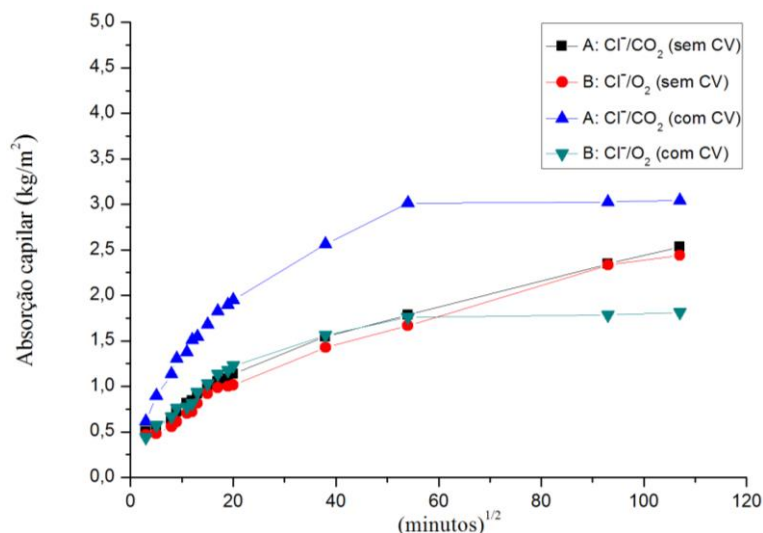


Figura 4: Cinética de absorção capilar obtida após 168 dias de ensaio de imersão e secagem.

Com base nas curvas apresentadas na Figura 4, 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 [19] que funcionam como caminho privilegiado para a penetração de líquidos. Estes valores são apresentados na Tabela 4, bem como o respetivo coeficiente de correlação linear (R^2).

Tabela 4 - Coeficiente de absorção capilar

Período de ensaio [dias]	Situação	CV	S [$\text{kg/m}^2/(\text{min})^{1/2}$]	R^2 [%]
168	A (Cl/CO ₂)	Sem	0,041	97,78
	B (Cl/O ₂)	Sem	0,038	93,53
	A (Cl/CO ₂)	Com	0,087	97,40
	B (Cl/O ₂)	Com	0,045	96,20

As curvas apresentadas acima mostram um desenvolvimento esperado, com inclinação decrescente ao longo do tempo. No caso dos provetes com CV, as curvas encontram-se bem distintas uma da outra, evidenciando uma grande diferença de absorção entre os provetes submetidos à situações onde há carbonatação, ciclo A, e à situação onde não há carbonatação, ciclo B. Ao contrário, no caso dos provetes sem CV, as curvas encontram-se bastante próximas. Os coeficientes de absorção capilar apresentados na Tabela 4 confirmam estas afirmações. Estes resultados estão coerentes com os perfis de cloretos apresentados na alínea anterior.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Se, por um lado, a carbonatação promove uma alteração microestrutural que torna os poros mais densos [20] e dificulta a penetração de cloretos, por outro, liberta os cloretos anteriormente combinados aumentando, consequentemente, a quantidade de cloretos livres que são os que realmente contribuem para a deterioração das estruturas de betão armado [21]. Assim como a carbonatação, a adição de CV também tem um papel ambíguo na difusão de cloretos em ambiente contendo CO₂. 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 de penetrar no betão [2]. 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, consequentemente, aumenta a quantidade de cloretos livres, uma vez que a carbonatação liberta parte dos cloretos fixos.

No caso das amostras sem CV, observa-se uma dificuldade inicial na penetração de cloretos em amostras que sofreram carbonatação. Esta dificuldade indicia que o efeito de densificação dos poros, neste caso, foi superior ao da libertação de cloretos combinados, ou seja, a carbonatação contribuiu para diminuição da penetração de cloretos nas amostras sem CV. Entretanto, a reduzida profundidade de carbonatação atingida nestes provetes, 4,8 mm, pede cautela na análise dos resultados pois a carbonatação ficou restrita à zona superficial, zona que, geralmente, tem uma composição diferente do betão interior devido à fenómenos como o contato com moldes ou segregação dos agregados [22].

Nos provetes contendo CV, observa-se, como esperado, um aumento na profundidade de carbonatação em comparação com os provetes sem CV. Além disso, observa-se uma estabilização do teor total de cloretos, em valores relativamente altos, em toda a zona carbonatada. Estes fatos, em conjunto, corroboram as afirmações citadas no parágrafo inicial tanto no que diz respeito ao aumento da profundidade de carbonatação, quanto no que se refere ao aumento da quantidade de cloretos associado à carbonatação. Montemor *et al.* [23] estudando a corrosão em argamassas com CV expostas ao CO₂ e aos Cl⁻, chegaram a conclusão semelhante ao utilizarem 30% CV em substituição ao cimento.

Também é possível observar a formação de um pico tênue de cloretos próximo da interface entre a zona carbonatada e não carbonatada. A formação deste tipo de pico já havia sido verificada em um estudo sobre a deterioração do betão tendo em conta a ação combinada da carbonatação e dos iões cloreto, publicado em 2003 por Lee e Yon [24]. É importante ressaltar que o ensaio de imersão e secagem, pela sua natureza, também propicia a formação de pico no perfil de cloretos (Figura 5). No entanto, a formação deste pico, difere do caso verificado na Figura 3.

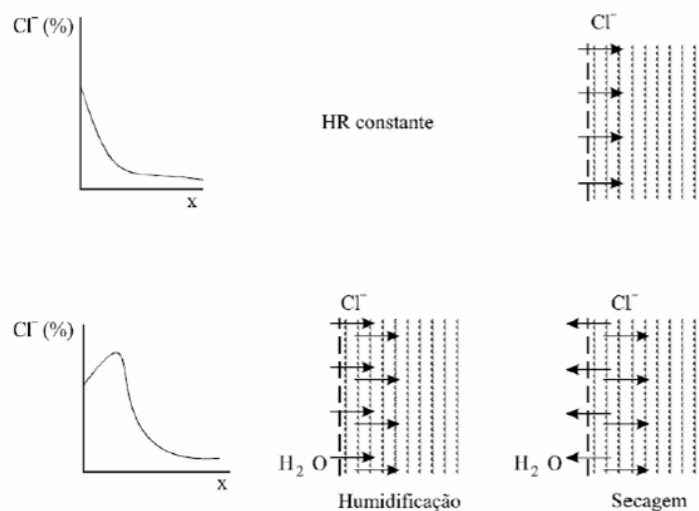


Figura 5: Simulação da penetração de cloretos em ambiente com humidade relativa (HR) constante e ambiente de imersão e secagem [25].

A formação do pico observado na Figura 3 pode estar relacionada com uma diferença na quantidade de cloretos livres. Na zona carbonatada, como explicado anteriormente, há um aumento na quantidade de cloretos livres devido à carbonatação. Já na zona seguinte, não carbonatada, este aumento não se verifica.

5. CONCLUSÕES

De uma maneira geral e, em especial, no que se refere ao papel das CV no ingresso de cloretos em amostras afetadas pela carbonatação, os resultados obtidos chamam a 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, uma vez que, nestes casos, o uso das CV no combate à penetração de cloretos pode passar de benéfico para desfavorável em função da exposição excessiva ao CO_2 . Entretanto, dada a importância do tema, é necessário avançar com mais estudos pois, os resultados aqui apresentados, 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.

6. 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 e à CIMENTEIRA DO LOURO e à BRITAMINHO por disponibilizarem os agregados utilizados.

7. REFERÊNCIAS

- [1] DURAR – Durabilidad de la armadura (1998); Manual de inspeccion, evaluacion y diagnostico de corrosion en estructuras de hormigon armado. CYTED – Programa Iberoamericano de Cinência y Tecnologia para el Desarrollo, 208.pp
- [2] Camões, A. *et al.*, "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.
- [3] Jung, S. *et al.*, "Influence of carbonation on the chloride diffusion in concrete" em SB07 Seoul: Proceedings of the International Conference on Sustainable Building Asia, Seoul, Korea, 2007.
- [4] Camões, A. *et al.*, "Influência das cinzas volantes no desempenho dos betões" BE2000, Encontro Nacional Betão Estrutural 2000, Porto, Portugal, 22- 24.11. 2000.
- [5] Neville, A. M. - Propriedades do Concreto. Pini, 2ª ed. São Paulo, 1997, 828p.

- [6] Vagheti, 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.
- [7] 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.
- [8] Costa, A.; Appleton, J. - "Concrete carbonation and chloride penetration in a marine environment", *Concrete Science and Engineering*, 2001, 3, 242-249.
- [9] Chindaprasirt, P. *et al.*, "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.
- [10] Malheiro, R. *et al.*, "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.
- [11] Ramezaniapour, A. A. *et al.*, "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.
- [12] Chengfang, Y. *et al.*, "Effect of carbonation on chloride diffusion in fly ash concrete", *Disaster Advances*, 2012, 5 (4).
- [13] Backus, J. *et al.*, "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] Coutinho, J. S. - "Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem", Doutorado, Universidade do Porto, Porto, 1998.
- [20] IHEKWAHA, N. M. *et al.*, "Carbonation and Electrochemical Chloride Extraction from Concrete", *Cement and Concrete Research*, v.26, n.7, 1996, 1095-1107.
- [21] MOHAMMED, T. U.; HAMADA, H. "Relationship Between Free Chloride and Total Chloride Contents in Concrete", *Cement and Concrete Research*, v. 33, 2003, 1487-1490.
- [22] Andrade, C. *et al.*, "Mathematical Modeling of a Concrete Surface "Skin Effect" on Diffusion in Chloride Contaminated Media", *Advanced Cement Based Materials*, 1997, 6, 2, 39-44.
- [23] Montemor, M.F *et al.*, "Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides", *Cement and Concrete Composites*, 2002, 24, 45-53.
- [24] LEE, C. S.; YOON, I. S. Prediction of Deterioration Process for Concrete Considering Combined Deterioration of Carbonation and Chlorides Ions. *Journal of de Korea Concrete Institute* . v.15, n.6, 2003, 902-912.
- [25] Coutinho, J. S. - "Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem", Doutorado, Universidade do Porto, Porto, 1998.