

CLB-MCS 2018
3º Congresso Luso-Brasileiro
Materiais de Construção Sustentáveis
Coimbra, 14-16 de fevereiro de 2018

REVESTIMENTOS TRADICIONAIS COMO PROTEÇÃO DE BETÕES DE ELEVADO VOLUME DE CINZAS VOLANTES FACE À CARBONATAÇÃO

RUI REIS^{1*}, JOÃO SOARES¹, AIRES CAMÕES¹, MANUEL RIBEIRO²

1: Universidade do Minho, CTAC
Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, 4800-058, Guimarães, Portugal
Email, ruicunhareis@gmail.com

2: Instituto Politécnico de Viana do Castelo, UIDM
IPVC, ESTG, 4900-347, Viana do Castelo, Portugal
Email, ribeiro@estg.ipvc.pt

Palavras-chave: Carbonatação, Proteção betão, Betão eco-eficiente, cinzas volantes, cal hidratada

Resumo *Os betões de elevado volume de cinzas volantes poderão ser materiais com melhor desempenho do que os betões correntes de cimento Portland. Além disso, são ambientalmente mais sustentáveis porque a sua composição contém menos clínquer e, ainda, porque incorporam um subproduto industrial poluente. No entanto, a sua resistência à carbonatação é reduzida, porque, através da própria reação pozolânica, dá-se a neutralização do hidróxido de cálcio, reduzindo o seu nível de alcalinidade, tão necessário para manter a passivação das armaduras. Uma das formas de aumentar a resistência ao ataque por carbonatação poderá estar na consideração da existência do revestimento do betão. De facto, na grande maioria das construções correntes, a presença de um revestimento sobre o betão é uma realidade, muitas vezes ignorada no estudo da durabilidade. Por este motivo, investigou-se qual a eficiência dos revestimentos quando aplicados sobre um betão de elevado volume de cinzas volantes. Deu-se prioridade aos revestimentos tradicionais sem pintura, de base cimentícia, cal hidratada ou ambos. Também se avaliou um revestimento com base em cinzas volantes. Submeteram-se a ensaios de carbonatação acelerada os betões revestidos, bem como as argamassas representativas das camadas dos revestimentos. Os resultados foram excelentes, observando-se que o desempenho dos betões revestidos foi, em média, superior a 35% face ao betão não revestido.*

1. INTRODUÇÃO

A carbonatação é um dos ataques mais incidentes nas estruturas de betão e, conseqüentemente, uma das causas mais importantes da sua degradação [1]. Esta patologia é mais relevante nas zonas urbanas e industriais, devido à elevada concentração de dióxido de carbono [2], que será tendencialmente crescente devido ao aumento da poluição e da temperatura [3, 4]. Mas, a suscetibilidade do ataque por carbonatação também está relacionada com a qualidade do betão [5]. E, ao contrário do que seria de supor, os betões mais modernos e ecológicos podem ser mais vulneráveis do que os betões tradicionais. Neste contexto, refere-se por exemplo, os betões de elevado volume de cinzas volantes, dotados de reduzida energia incorporada e, portanto, com um elevado valor ambiental, contendo um subproduto industrial poluente e menor teor de clínquer na sua composição. Mas estas vantagens podem estar comprometidas porque a resistência à carbonatação destes betões é reduzida: através da própria reação pozolânica, dá-se a neutralização do hidróxido de cálcio, reduzindo o seu nível de alcalinidade, tão necessário para manter a passivação das armaduras [6].

Uma das formas mais comuns para proteger o betão face à carbonatação é a aplicação de revestimentos [7], mas devido à complexidade do fenómeno, subsiste ainda uma enorme necessidade de investigação [3]. Um dos problemas prementes é que quando os revestimentos funcionam como barreira à difusão do dióxido de carbono, a sua baixa permeabilidade pode reter a humidade do betão [3]. Outra dificuldade poderá estar na aderência do recobrimento ao betão [8]. A maioria dos produtos anti carbonatação são tintas e argamassas cimentícias modificadas [7]. A constituição destes revestimentos poderá ser com base em produtos alquídicos, acrílicos, vinílicos, vinil-acrílicos, poliuretano, butadieno estireno ou mesmo materiais cristalinos reativos [3, 7, 8]. Mas, a proteção também pode ser fornecida pelos revestimentos tradicionais, que geralmente são utilizados nas obras correntes e a sua presença, geralmente, não é tida em conta na avaliação da durabilidade.

Os revestimentos tradicionais podem definir-se como *fortes* ou *fracos*, dependendo do teor de cimento. Revestimentos *fortes*, com elevado teor de cimento apresentam melhor trabalhabilidade, melhor aderência e menor porosidade [9]. Além disso, os revestimentos *fortes* fornecem proteção química face à carbonatação, porque quanto mais elevado for o teor de cimento, mais hidróxido de cálcio será produzido durante a hidratação, conferindo alcalinidade à matriz. Isto não significa, que os revestimentos *fracos*, não sejam indicados como proteção. Estes apresentam a vantagem da menor propensão à fissuração, evitando a entrada do agente agressor. Além disso, se os revestimentos *fracos* forem facilmente carbonatáveis, quer pela sua reduzida espessura ou por serem constituídos por hidróxido de cálcio, estes podem constituir uma barreira física, impedindo que os reagentes carbonatáveis entrem em contacto entre si. De uma forma simplificada, durante o avanço da frente de carbonatação do betão, o dióxido de carbono difunde-se para o interior, enquanto o hidróxido de cálcio difunde-se das camadas interiores para as camadas exteriores do betão. Esta dupla difusão é absolutamente necessária para o processo continuar. Havendo um impedimento, físico ou químico, para qualquer um destes reagentes, a frente de carbonatação não poderá avançar.

Tradicionalmente, os revestimentos de ligantes minerais são realizados em várias camadas, tendo cada uma a sua função. É uma forma de diminuir a porosidade, a retração e a fendilhação, com o objetivo último de impedir a entrada dos agentes agressores. Principalmente, quando se utilizam argamassas *fortes*. Para a correta aplicação das várias camadas, é fundamental obedecer-se a duas regras. Primeiro, a regra da regressividade do ligante: o teor de ligante deve diminuir desde as camadas interiores para as exteriores. Assim, previne-se que no caso de surgir uma fenda, esta não atravesse a totalidade do revestimento. Segundo, os intervalos de secagem devem ser prolongados, para que a retração de cada camada seja atingida parcialmente antes da aplicação da camada seguinte. Assim, os revestimentos tradicionais apresentam geralmente três ou mais camadas: *crepido*, *camada base* (com uma ou mais camadas) e *acabamento*. A função do *crepido* é melhorar a aderência, pelo que deve ser uma camada descontínua, rugosa e com elevado teor de ligante. A *camada base* é homogénea, permite garantir a planeza, a verticalidade, contribuir para a regularidade superficial, bem como fornecer impermeabilidade e garantir uma boa aderência à camada seguinte. O *acabamento* tem funções decorativas, contribuindo também para a impermeabilização e resistência

aos choques [9].

Assim, este tipo de revestimentos, tão comum, apresenta características que poderão ser funcionais face ao ataque por carbonatação: serem constituídos por várias camadas, o teor regressivo de ligante e, provavelmente, uma difusão do vapor de água adequada. Neste contexto, foi desenvolvido um programa experimental com o objetivo principal de avaliar a eficiência de vários revestimentos, sobre um betão com elevado volume de cinzas volantes. A composição dos revestimentos foi baseada em publicação de referência [9], considerando o *crespido* e as *camadas de base* sem acabamento. Foram também incluídos revestimentos com cal hidratada e cinzas volantes, pretendendo obter-se uma barreira física. Finalmente, foi estudado um tipo de revestimento, delgado, com elevado teor de cimento, pretendendo-se que funcione como uma barreira química.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Para a produção do betão, adotou-se como ligante, cimento e cinzas volantes, bem como três tipos de agregados. Para os revestimentos, foi utilizado como ligante, cimento, cinzas volantes e cal hidratada, mais um aditivo para o *crespido* e apenas um tipo de agregado, o mais fino.

Adotou-se o cimento do tipo CEM I-42.5 R, comercializado pela *SECIL* na sua fábrica de Maceira-Liz, Este possuía um teor em óxidos de cálcio de 65.06%, com constituição mineralógica de C_3S e C_2S de 15.5% e 15.3%, respetivamente, obtendo uma resistência à compressão aos 28 dias de 58.4 MPa [10]. Pelo ensaio de granulometria laser, observou-se que a dimensão máxima das partículas foi de 36.80 μm , com $d_{50}=9.30 \mu\text{m}$ (Figura 1 b). Na camada de *crespido*, além do cimento, foi ainda empregue Sikalatex, usada como adição, de forma a fomentar a aderência entre o betão e primeira camada de base.

As cinzas volantes foram obtidas da central termoelétrica do Pego. Estas foram submetidas a análises de microscópio eletrónico para caracterização microestrutural (*MEV*), equipado com espectroscopia dispersiva de raios X (*EDS*), para análise química. Também foram realizados ensaios de perda ao fogo, de dissolução seletiva com ácido fluorídrico, espectrometria de fluorescência de raios X (*FRX*), análises térmicas simultâneas (*ATS*) e difração de raios X (*DRX*) com refinamento de *Rietveld*. Na Tabela 1 apresenta-se a sua composição em óxidos, fazendo nota que os resultados detalhados fazem parte de publicações prévias [11, 12]. Concluiu-se que as cinzas volantes pertenciam à *classe F* [13], sendo a sua composição em óxidos constituída essencialmente por sílica, alumina e ferro, sob a forma mineralógica de quartzo, mullite e hematite, apresentando uma fase vítrea (reativa) de 62.5%. A perda ao fogo foi reduzida, 3.07%, classificando-se na *classe A* [14]. No que respeita à forma das partículas, verificou-se que estas eram constituídas essencialmente por cenosferas, de geometria regular, com alguns aglomerados, raros, de carbono. Averiguou-se que a dimensão máxima das partículas foi de 32.57 μm com um $d_{50} = 8.55 \mu\text{m}$, concluindo-se que as cinzas volantes eram ligeiramente mais finas que o cimento, exceto nas partículas mais finas.

Tabela 1 – Propriedades químicas das cinzas volantes: teor em óxidos.

<i>Propriedades químicas [%]</i>															
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Sr	Ba	Mn	Rb	Zr	Rest*
<i>FRX</i>	55.1	26.6	5.7	2.58	1.3	1.42	0.26	1.33	0.72	0.11	0.134	0.038	0.008	0.042	4.66
<i>EDS</i>	56.1	29.3	5.3	3.6	1.4	1.8	1.2	1.3	--	--	--	--	--	--	--

*Elementos de número atómico < 11

A cal hidratada foi proveniente da marca *Lusical*, referência *H100*. Através de ensaios de análises térmicas simultâneas (*Netzsch 402 EP*), com uma taxa de aquecimento de 10 °C /min, foi possível constatar a sua pureza elevada: os teores de hidróxido de cálcio e de carbonato de cálcio

correspondiam a 92.1% e 3.6%, respetivamente, valores coerentes com a informação do produtor [15]. A cal hidratada foi o mais fino dos ligantes, com dimensão máxima das partículas de 10.41 μm e $d_{50} = 3.80 \mu\text{m}$, tendo em boa nota que foi utilizada cal proveniente de um saco perfeitamente fechado, evitando ao máximo a sua exposição ao ambiente.

Foram utilizados três tipos de agregados: areia rolada do rio Douro, extraída na localidade de Entre-os-Rios (areia 0-4); duas britas graníticas, angulosas e rugosas, provenientes da pedreira “Sorte do Mato do Monte das Lagedas” do distrito de Guimarães (brita 4-8 e brita 6-12). Na Tabela 2 e na Figura 1 (a) estão sumarizados os resultados dos ensaios realizados para os agregados. Propriedades adicionais poderão ser consultados nas fichas técnicas do produtor [16].

Tabela 2. Características dos agregados do betão.

Nome comercial			Areia 0/4	Brita 4/8	Brita 6/12	Referência
Granulometria*				Gc85/20	Gc85/20	[17]
Origem			Rio Douro	Pedreira	Pedreira	
$D_{\text{máx}}$ (ASTM)	D	[mm]	2.0	12.7	12.7	[18]
$D_{\text{máx}}$ (Faury)	D	[mm]	4.2	10.3	13.1	[19]
$D_{\text{mín}}$ (ASTM)	d	[mm]	0.3	4.0	8.0	[18]
Teor finos	f	[%]	0.2	0.4	0.3	[20]
Teor finos*				f1.5	f1.5	[17]
Módulo Finura	μ	[-]	3.2	6.5	8.0	[21]
Diâmetro médio ($d\mu$)	$d\mu$	[mm]	0.6	5.3	8.0	[21]
Diâmetro médio (d_{50})	d_{50}	[mm]	0.8	6.1	10.5	
Massa volúmica						[22]
Material impermeável	ρ_a	[Mg/m ³]	2.55	2.67	2.67	
Part. secas estufa	ρ_{rd}	[Mg/m ³]	2.50	2.58	2.61	
Part. saturadas e sup. seca	ρ_{ssd}	[Mg/m ³]	2.52	2.61	2.63	
Baridade seca s/ comp.	ρ_b	[Mg/m ³]	1.48	1.31	1.34	[23]
Volume vazios	v	[%]	40.6%	49.3%	48.8%	[23]
Absorção de água	WA_{24}	[%]	0.7%	1.2%	0.9%	[22]
Teor humidade	w	[%]	3.4%	0.8%	0.6%	[24]

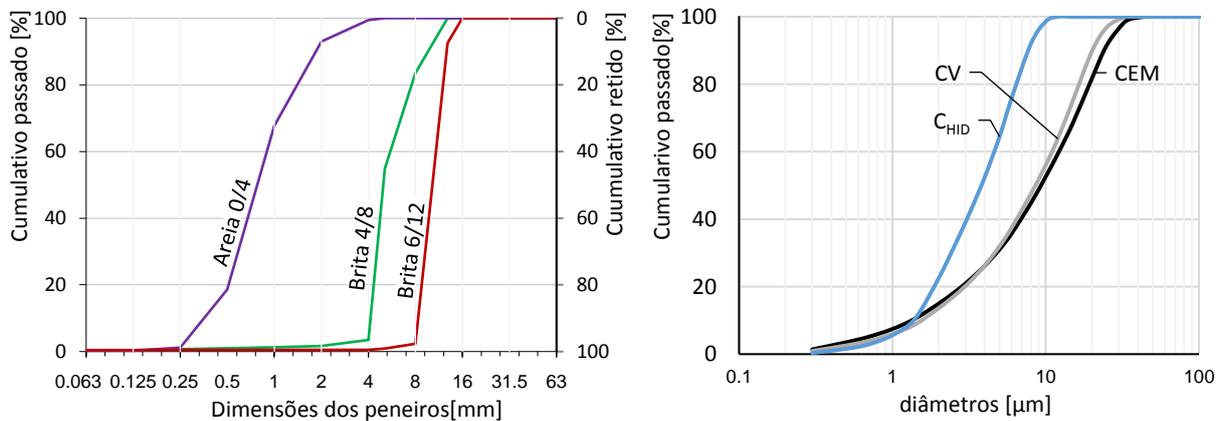


Figura 1. Curvas granulométricas: agregados (a) e ligantes (b).

2.2. Métodos

Para a composição do material de suporte aos revestimentos, optou-se por um betão com 50% de incorporação de cinzas volantes, em massa do ligante. Para facilitar a penetração de dióxido de carbono na matriz, considerou-se uma razão água-ligante de 0.65, que revelou ser elevada o suficiente para uma permanência em câmara climática de 60 dias (Tabela 3).

Tabela 3. Composição do betão.

Mistura	CEM I 42.5 R [kg/m ³]	CV [kg/m ³]	Areia 0-4 [kg/m ³]	Brita 4-8 [kg/m ³]	Brita 6-12 [kg/m ³]	A/L [-]
I	165.0	165.0	732.9	568	324.4	0.65

Para a composição dos revestimentos foram utilizadas sete argamassas, com ligantes de cimento, cal hidratada e cinzas volantes (Tabela 4). Com estas, de acordo com a sua utilização, foi possível constituir nove tipos de revestimento diferentes, mais um padrão, totalizando dez possibilidades (Tabela 5). Foram consideradas três camadas, no máximo: *crespido*, *primeira camada de base* e *segunda camada de base*. Assim, o “revestimento 1” refere-se à viga de betão sem qualquer revestimento. O “revestimento 2” refere-se apenas ao *crespido*, sendo neste trabalho única camada com adição de SikalateX. Os “revestimentos 3 a 5” referem-se a revestimentos tradicionais cimentícios. Nos “revestimentos 6 a 8” foi utilizada a cal hidratada. No “revestimento 9”, foram usadas cinzas volantes como ligante. Por fim, no “revestimento 10”, empregou-se uma camada de argamassa, *forte*, de cimento, *delgada* e sem *crespido*.

Tabela 4. Composição das argamassas.

Tipo	Descrição	CEM [Vol]	CV [Vol]	C _{HID} [Vol]	Areia [Vol]	SikalateX [S/N]	A/L [-]
a	C+A 1:1	1	--	--	1	N	0.90
b	C+A 1:2 (CP)	1	--	--	2	S	0.65
c	C+A 1:3	1	--	--	3	N	0.80
d	C+A 1:4	1	--	--	4	N	0.95
e	CH+A 1:3	-	--	3	--	N	2.00
f	C+CH+A 1:0.5:4.5	1	--	0.5	4.5	N	0.70
g	C+CV+A 1:0.5:4.5	1	0.5	--	4.5	N	0.80

C-cimento; CV-cinzas volantes; C_{HID}-cal hidratada; A-areia-SikalateX-SikalateX; CP-crespido

Tabela 5. Composição dos revestimentos.

Revest.	Descrição	Argam.	Camadas [un]	Espessura [mm]
1	Sem revestimento.	--	0	0
2	CP:crepido (camada descontínua).	b	1	0/5
3	CP+camada simples de cimento e areia. 1:3	c	2	10
4	CP+camada simples de cimento e areia. 1:3	c	2	20
5	CP+camada dupla de cimento e areia. 1:3 + 1:4	c+d	3	10+10
6	CP+camada simples de cal hidratada e areia. 1:3	e	2	10
7	CP+camada simples de cimento, cal hidratada e areia. Traço 1:0.5:4.5	f	2	10
8	CP+camada dupla do tipo [3]+[7]	c+f	3	10+10
9	CP+camada simples de cimento, cinzas volantes e areia. Traço 1:0.5:4.5	g	2	10
10	Camada <i>delgada</i> de cimento e areia	a	1	3

A metodologia de investigação consistiu em diversas etapas (Figura 2). Primeiro, fabricou-se o suporte de betão. Para os ensaios dos revestimentos utilizaram-se moldes 850x100x100 mm³, divididos em 3 partes, de forma a obterem-se pequenas vigas. Estas permaneceram em cura húmida até aos 90 dias de maturidade, a partir da qual foram submetidas a pré-condicionamento em estufa a 40 °C. Depois, foram colocados os revestimentos sobre as vigas, nas duas faces laterais, tendo o cuidado de aplicar as camadas com intervalos de 3 dias. Depois, os topos das vigas foram selados com parafina. Após secagem, estas foram sujeitas a ensaio de carbonatação acelerada durante 60

dias, com câmara climática a uma temperatura de 20 ± 2 °C; humidade relativa de $55 \pm 5\%$ e uma concentração de dióxido de carbono de $4 \pm 0.5\%$. Por fim, a profundidade de carbonatação foi medida apenas nos provetes de betão, utilizando timolftaleína como indicador ácido-base [25].

Para os restantes ensaios, resistência à compressão, índice esclerométrico resistividade elétrica, velocidade de ultrassons, absorção por imersão e por capilaridade, utilizaram-se provetes $100 \times 100 \times 100$ mm³. Estes também permaneceram em cura húmida até aos 90 dias, sendo utilizados três provetes por cada ensaio. Depois, submeteram-se dois provetes ao procedimento de pré-condicionamento (7 dias), secagem (23 dias) e câmara climática (60 dias). Mantendo-se um provete por ensaio em cura húmida até aos 180 dias. Desta forma, foi possível avaliar o desempenho de betão aos 180 dias, antes e após a carbonatação acelerada.

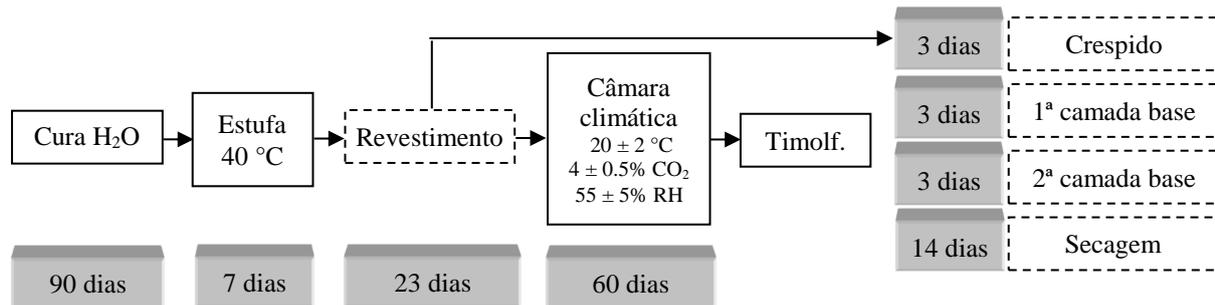


Figura 2. Cronograma do trabalho experimental.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 28, 90 e 180 dias, obtendo-se a média aritmética de cada ensaio. Simultaneamente, foram realizadas as leituras de esclerómetro: com o provete em carga na prensa, realizaram-se 9 leituras, utilizando-se a mediana como resultado final [26, 27]. A resistividade elétrica foi avaliada aos 7, 14, 21, 28, 60, 90 e 180 dias, com uma sonda *Wenner* da marca *Proceq*, modelo *Resipod* com 4 pontos afastados de 38 mm. O valor da resistividade elétrica foi obtido pela média aritmética das leituras, tendo-se efetuado 8 leituras por provete, 2 por face, desfasadas a 180° [28]. O ensaio de velocidade de ultrassons foi realizado nos mesmos provetes e de modo semelhante ao da resistividade elétrica. Realizaram-se 6 leituras por provete, por transmissão direta [29]. Os ensaios de absorção por imersão e por capilaridade foram realizados aos 28, 90 e 180 dias, extraindo-se os resultados pela média aritmética [30, 31].

3. RESULTADOS

3.1. Betão não revestido

Na Figura 3 apresentam-se os resultados da resistência à compressão e do índice esclerométrico. A tracejado, estão representados os resultados após a submissão dos provetes a carbonatação acelerada. Verificou-se que o crescimento da resistência mecânica prolongou-se no tempo, pois entre os 28 e os 180 dias, a resistência à compressão aumentou cerca de 78%. Tal deveu-se à reação pozolânica: durante a hidratação do cimento foi libertado hidróxido de cálcio, que por sua vez reagiu com as cinzas volantes. Este comportamento é uma das vantagens dos betões com cinzas volantes, pois contrariamente ao que acontece nos betões correntes, as resistências surgem em maturidades mais avançadas, reduzindo os problemas do calor de hidratação e fissuração.

O índice esclerométrico mostrou a mesma tendência, visto que entre os 28 e os 180 dias os valores cresceram 60%. Este índice é representativo da resistência superficial do betão. Logo corresponde ao endurecimento do betão devido à hidratação e reação pozolânica, acrescido do endurecimento devido à carbonatação superficial dos provetes. Após carbonatação acelerada, verificou-se que tanto a resistência à compressão como o índice esclerométrico desceram 31% e 9%, respetivamente. Em

betões correntes, a carbonatação diminui a porosidade e aumenta a resistência. Mas, devido ao elevado volume de cinzas volantes, o dióxido de carbono pode alterar a microestrutura, diminuindo a sua resistência mecânica [32-34]. Por esse motivo, após carbonatação, devido à elevada penetração do dióxido de carbono no betão, foi observada uma redução mais elevada no ensaio de resistência à compressão.

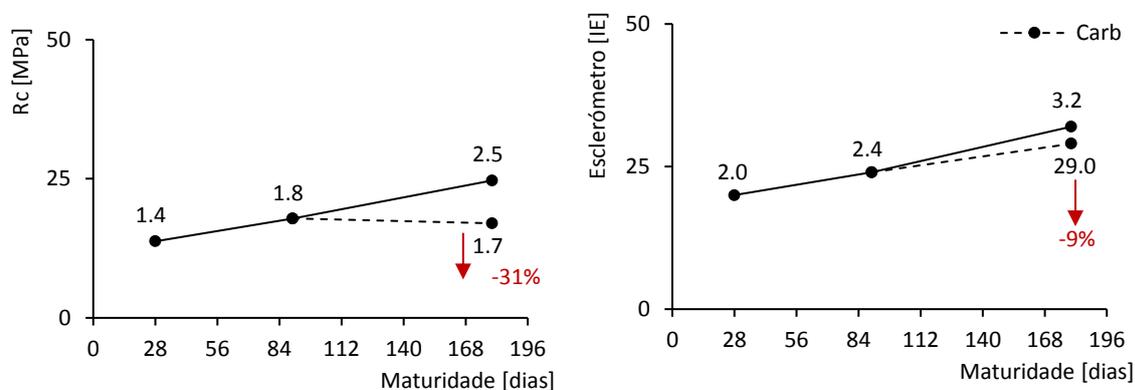


Figura 3. Resistência mecânica do betão: compressão (a) e índice esclerométrico (b).

Na Figura 4 encontram-se os resultados dos ensaios de resistividade elétrica e de ultrassons. Tal como esperado, tanto a resistividade como a velocidade de ultrassons aumentaram com a maturidade. Tal deveu-se à contínua densificação da matriz do betão, quer pela hidratação do cimento, quer pela reação pozolânica das cinzas volantes: diminuindo a porosidade, aumentou-se a resistividade do material. Além disso, as ondas propagam-se mais rapidamente em meios mais homogêneos e não fissurados.

Após ensaio de carbonatação acelerada, observou-se uma quebra de 45% na resistividade elétrica e de 6% na velocidade de ultrassons. Embora a maior quebra se tenha verificado na resistividade elétrica, note-se que os valores absolutos após carbonatação, aos 180 dias, regrediram para níveis correspondentes a maturidades de 90 dias na resistividade e para maturidades de 60 dias no caso do ultrassons. Tal sugere a degradação do betão após carbonatação, podendo ser o resultado da alteração da distribuição da porosidade, mas também de possível fendilhação, já verificado numa investigação em pastas [33]. Estes resultados estão em linha com os ensaios de resistência mecânica.

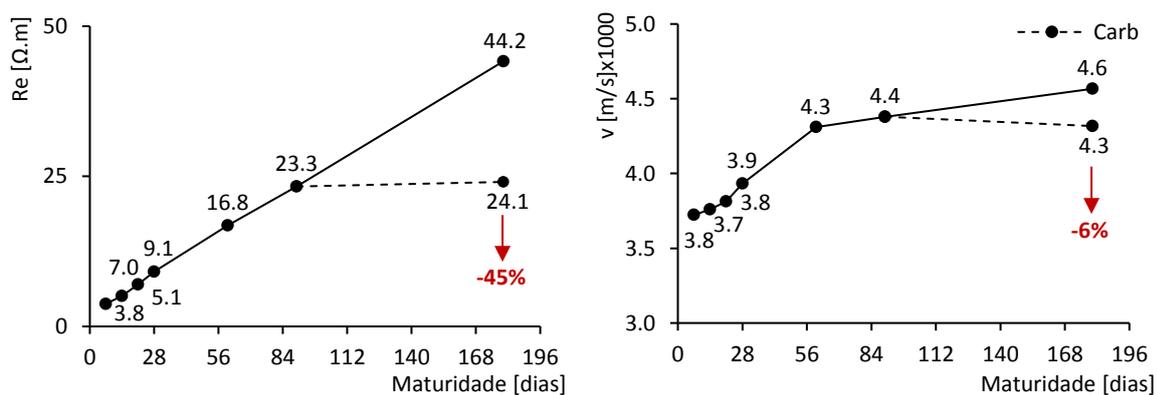


Figura 4. Evolução da resistividade elétrica (a) e velocidade de ultrassons (b) no betão.

Na figura seguinte (Figura 5), apresentam-se os resultados dos ensaios de absorção por imersão e por capilaridade. Verificou-se nos dois ensaios que a absorção aos 180 dias foi ligeiramente inferior à verificada aos 90 dias, correspondente a uma maior compactidade da matriz, logo a uma menor porosidade. Após carbonatação acelerada, a absorção por imersão reduziu 9%, mas a absorção por capilaridade aumentou 64%. De forma a garantir a coerência com os restantes ensaios, sugere-se que a carbonatação aumentou de facto a densidade da matriz, diminuindo a porosidade total, pois os produtos da carbonatação preencheram os vazios disponíveis. Mas, pode ter-se verificado uma alteração drástica da sua distribuição, diminuindo os pequenos poros (menor imersão) e aumentando os grandes poros (maior capilaridade). Também poderá ter-se verificado a fendilhação do betão, o que também explicaria o crescimento da capilaridade. Este comportamento já tinha sido observado numa investigação em argamassas [34].

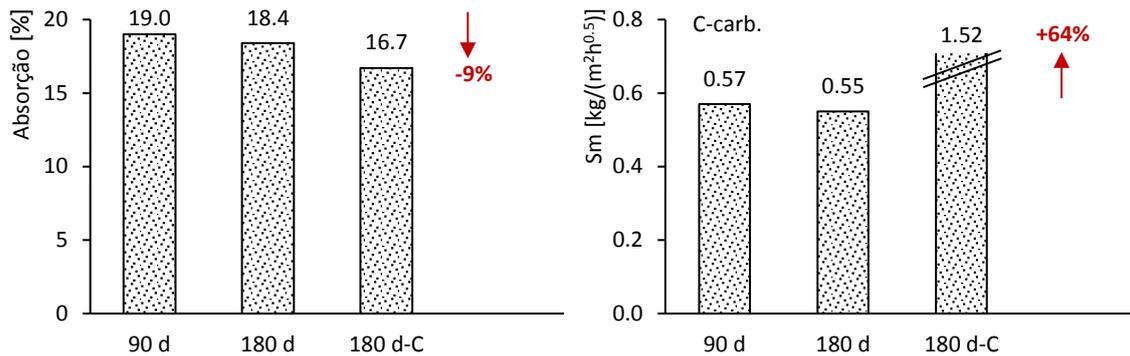


Figura 5. Evolução da absorção no betão: por imersão (a) e por capilaridade (b).

3.2. Revestimentos e betão revestido

Na Figura 6 encontram-se os resultados dos ensaios realizada às argamassas. Ficou evidente pela simetria dos gráficos, que existiu uma forte correlação entre a quantidade de cimento e a resistência à compressão ou profundidade de carbonatação. Tal está de acordo com o esperado, pois as argamassas com maior teor em cimento, *fortes*, produziram maior quantidade de hidróxido de cálcio, aumentando a alcalinidade da matriz, fornecendo resistência química face à carbonatação. Também se averiguou que a argamassa “*tipo e*”, apenas com cal hidratada, não apresentava o mínimo de resistência para suportar o ensaio de compressão. Além disso, as argamassas “*tipo e*” e “*tipo g*” estavam desprovidas de resistência à carbonatação, pelo que os provetes ficaram totalmente carbonatados.

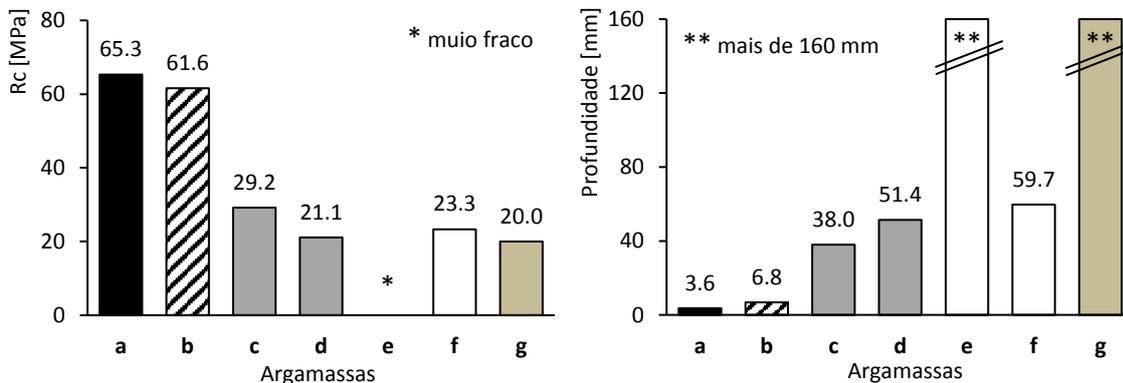


Figura 6. Argamassas: resistência à compressão (a) e profundidade de carbonatação (b).

Os resultados finais referentes ao betão revestido estão representados na Figura 7. Confirmou-se que o pior resultado foi para o betão sem revestimento, a referência, “*revestimento 1*”. Assim, todos os revestimentos produziram proteção ao betão, com um desempenho médio de 35%. Mesmo os revestimentos que *per se* eram desprovidos de resistência à carbonatação, quando testados juntamente com o betão, obtiveram resultados melhores do que a referência. Estão incluídas neste caso as argamassas “*tipo e*” e “*tipo g*”, que quando aplicadas no betão, “*revestimentos 6 e 9*”, resultaram numa diminuição da profundidade de carbonatação superior a 18%. Uma vez que estas argamassas não forneciam proteção química, sugere-se que o tipo de proteção destas foi essencialmente do tipo “barreira física”: após contacto com o ambiente, as camadas de revestimento carbonataram, podendo reduzir o acesso ao dióxido de carbono atmosférico para o interior do betão.

O revestimento apenas com *crespido*, “*revestimento 2*”, obteve uma redução de quase 50%. Pese embora este revestimento seja descontínuo, o facto de apresentar elevado teor de cimento e, conseqüentemente, fornecer elevada alcalinidade, proporcionaram provavelmente proteção química. Note-se que o *crespido* continha um promotor de aderência e este pode eventualmente ter desempenhado um papel relevante. No entanto, embora o *crespido* tenha sido aplicado também nos “*revestimentos 3 a 9*”, o seu desempenho nem sempre foi tão elevado.

O revestimento constituído por camada delgada de cimento e sem *crespido*, “*revestimento 10*”, obteve um resultado pouco melhor do que a referência. Poderá estar relacionado com a reduzida espessura (3 mm), sendo insuficiente para proporcionar proteção física ou química, independentemente do elevado teor de cimento. Poderá estar relacionado com o elevado volume de cinzas volantes do betão, e a provável forte neutralização dos compostos alcalinos. É possível que uma camada delgada, de espessura ligeiramente superior, resulte numa proteção efetiva mais eficiente.

Os melhores resultados foram obtidos nos revestimentos com duas *camadas de base*, referenciados com a letra “*D*”. Tal pode dever-se à combinação de uma espessura maior, mas também ao maior número de interfaces de camadas, obtendo-se uma sinergia da proteção química e da proteção física. O melhor exemplo, e simultaneamente o melhor resultado desta investigação, foi o revestimento duplo contendo cal hidratada, “*revestimento 8*”, obtendo uma melhoria de desempenho de 63%. Sugere-se que a cal hidratada da *segunda camada de base* do revestimento, após carbonatação, poderá ter funcionado como barreira física, enquanto a *primeira camada de base*, tenha funcionado como proteção química.

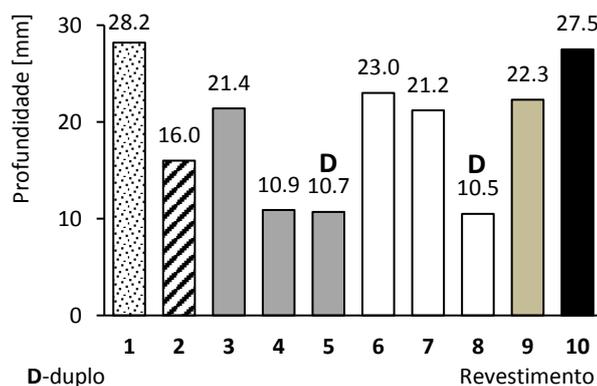


Figura 7. Profundidade de carbonatação do betão revestido.

4. CONCLUSÕES

O desempenho dos betões de elevado volume de cinzas volantes pode degradar-se pela carbonatação. O ataque de carbonatação pelo dióxido de carbono atmosférico, acrescido da neutralização dos compostos alcalinos pelas cinzas volantes, afetam a microestrutura, obrigando a

uma proteção mais efetiva contra o ataque.

Os revestimentos apresentaram, em geral, uma profundidade de carbonatação reduzida. A melhoria de desempenho média dos revestimentos situou-se acima dos 35%. Apenas o revestimento delgado, obteve um resultado semelhante ao da referência.

Os revestimentos com várias camadas apresentaram resultados promissores, com desempenhos superiores a 60%. A introdução de cal hidratada na sua composição pode ser útil para criar uma barreira física, evitando a reação de carbonatação.

Poderá ser possível diminuir as exigências de composição dos betões, incluindo os betões de elevado volume de cinzas volantes, considerando a existência dos revestimentos. Desta forma, reduz-se a utilização de cimento, com vantagens económicas e ambientais evidentes.

É necessário averiguar o papel do *crespido* e dos promotores de aderência. Também será necessário estudar ao longo do tempo a proteção dos revestimentos em cenários de carbonatação natural, a sua aderência ao suporte, bem como avaliar o papel que poderá desempenhar na evolução da humidade do suporte.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às equipas do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho e da Unidade de Investigação e Desenvolvimento de Materiais da ESTG do Instituto Politécnico de Viana do Castelo na colaboração desta investigação. Agradecem também à Secil SA. e Mota Engil SA pela amável cedência do cimento e das cinzas volantes, respetivamente.

As instalações do MEV e do DRX foram financiadas por fundos do FEDER através do QREN – Aviso SAIECT-IEC/2/2010, Operação NORTE-07-0162-FEDER-000050

REFERÊNCIAS

- [1] Thiery, M., 2005. *Model of atmospheric carbonation of cementitious materials: taken into account kinetic effects and microstructural and water changes (in French)*. PhD thesis. Ecole des Ponts Paris Tech.
- [2] Papadakis, V.G., 2000. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. *Cement and Concrete Research*, 30(2), pp.291-299.
- [3] McGrath, P.F., 2016. A simple chamber for accelerated carbonation testing of concrete. *McGrath Engineering Ltd*.
- [4] WMO, 2016. *WMO greenhouse gas bulletin: the state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2015*. Geneva: WMO (World Meteorological Organization).
- [5] Baroghel-Bouny, V., 2004. *Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction état de l'art et guide pour la mise en oeuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité*. [S.l.] [Bagneux]: [AFGC] [SETRA].
- [6] Lee, H.J., Kim, D.G., Lee, J.H. and Cho, M.S., 2012. A study for carbonation degree on Concrete using a phenolphthalein indicator and fourier-transform infrared spectroscopy. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 34(62), pp.184-190.
- [7] Simas, M., 2007. *Concrete protection systems against carbonation (in Portuguese)*. MSc. New University of Lisbon.
- [8] Serrano, I.D. and Moreno, E.I., 2006. Barrier films: an option against carbonation of reinforced concrete (in Castilian). *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 10-2(2006), pp.37-45.
- [9] Veiga, M.R. and Faria, P., Coating of mineral and mixed binders, based on cement, lime and synthetic resin (in Portuguese). In: LNEC ed. 2004. *Specialization in wall coverings*. Lisbon: LNEC

(Laboratório Nacional de Engenharia Civil). Ch.II. pp. 40-120.

[10] SECIL, 2014. *Bulletin N. ACM-008/2014 - portland cement - EN 197-1 CEM I 42.5 R: results of Self-control (in Portuguese)*. Maceira-Liz: SECIL.

[11] Reis, R., Ribeiro, M., Abrantes, J.C.C., Camões, A., Teixeira, E. and Malheiro, R., 2016. Methodology for analysis of the reactivity of coal fly ash using selective dissolution by hydrofluoric acid. *Key Engineering Materials*, 711, pp.1126-1133.

[12] Reis, R., Camões, A., Ribeiro, M. and Malheiro, R., 2016. Calcium hydroxide curing for accelerated carbonation testing of high volume fly ash cementitious blends. In: *ICCS16-II International Conference on Concrete Sustainability*. Madrid, 13-15 June 2016.

[13] ASTM, 2005. *C618-05 Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. West Conshohocken: ASTM (American Society for Testing and Materials).

[14] IPQ, 2006. *EN 196-2:2006 cements test methods. Part 2: Chemical analysis of cement (in Portuguese)*. Caparica: IPQ (Instituto Português da Qualidade).

[15] Lusical, 2012. *Product specification sheet: hydrated lime H100 (in Portuguese)*. Lusical-Companhia lusitana de cal SA.

[16] Britaminho, 2013. *Britaminho: product specification sheet (in Portuguese)*. Guimarães: Britaminho-granitos e britas do Minho Lda.

[17] BSI, 2002. *BS EN 12620:2002+A1:2008. Standard specification for concrete aggregates*. London, BSI (British Standards Institution).

[18] ASTM, 2001. *C33/C33M. Standard specification for concrete aggregates*. West Conshohocken, ASTM International (American Society For Testing And Materials).

[19] Coutinho, A., 2006. *Manufacturing and properties of concrete - Volume II (in Portuguese)*. 2.^a ed. Lisbon: LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil).

[20] IPQ, 2000. *NP EN 933-1:2000 Tests for geometrical properties of aggregates. Part 1: determination of particle size distribution. Sieving method (in Portuguese)*. Caparica: IPQ (Instituto Português da Qualidade).

[21] Coutinho, A., 2006. *Manufacturing and properties of concrete - Volume I (in Portuguese)*. 4.^a ed. Lisbon: LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil).

[22] CEN, 2000. *EN 1097-6:2000 Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 6: determination of particle density and water absorption*. Brussels: CEN (European Committee for Standardization).

[23] IPQ, 2002. *NP EN 1097-3:2002 Tests for geometrical properties of aggregates. Part 5: determination of loose bulk density and voids (in Portuguese)*. Caparica: IPQ (Instituto Português da Qualidade).

[24] IPQ, 2002. *NP EN 1097-5:2002 Tests for geometrical properties of aggregates. Part 5: determination of the water content by drying in a ventilated oven (in Portuguese)*. Caparica: IPQ (Instituto Português da Qualidade).

[25] CEN, 2010. *Testing hardened concrete-Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method FprCEN/TS 12390-12: 2010*. Brussels: CEN (European Committee for Standardization).

[26] IPQ, 2003. *NP EN 12504-2: 2003 Testing concrete in structures. Part 2: non-destructive testing. Determination of rebound number (in Portuguese)*. Caparica: IPQ (Instituto Português da Qualidade).

[27] IPQ, 2003. *NP EN 12390-3: 2003 Testing hardened concrete. Part 3: compressive strength of test specimens (in Portuguese)*. Caparica: IPQ (Instituto Português da Qualidade).

- [28] UM, 2005. *PE 002 Concrete. Electrical resistivity: measurement of the electrical resistivity of a surface of a concrete element (in Portuguese)*. Guimarães: UM-Laboratório de materiais de construção (Universidade do Minho).
- [29] IPQ, 2007. *NP EN 12504-4_ 2007 Concrete tests on structures. Part 4: speed determination of ultrasound propagation (in Portuguese)*. Caparica: IPQ (Instituto Português da Qualidade).
- [30] LNEC, 1993. *E 394-1993. Determination of water absorption by immersion (in Portuguese)*. Lisbon, LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil).
- [31] CEN, 2002. *BS EN 13057: 2002. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of resistance of capillary absorption (english version)*. Brussels, CEN (European Committee for Standardization).
- [32] Faria, M., 2004. *Mortar coating for old masonry (in Portuguese)*. PhD. New University of Lisbon.
- [33] Herdeiro, J., 2017. *Cement matrix pastes with high volume of fly ash and calcium hydroxide (in Portuguese)*. MSc. University of Minho.
- [34] Reis, R., 2013. *Carbonation resistance of high volume of fly ash concrete (in Portuguese)*. PhD thesis project. University of Minho.