

Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis
5, 6 e 7 de Março
Guimarães, Portugal

Resistência à carbonatação de betões de elevado volume de cinzas volantes

REIS Rui^{1,a}, MALHEIRO Raphaele^{1,b}, CAMÕES Aires^{1,c} e RIBEIRO Manuel^{2,d}

¹ C-TAC, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058, Guimarães, Portugal

² UIDM, ESTG, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 4900-347, Viana do Castelo, Portugal

^aruicunhareis@gmail.com, ^braphamalheiro@gmail.com, ^caires@civil.uminho.pt,
^dribeiro@estg.ipvc.pt

Palavras-chave: Carbonatação, Sustentabilidade, Durabilidade, Cinzas volantes.

Resumo. A indústria do cimento é responsável por uma larga cota dos problemas ambientais a nível global: é a maior consumidora dos recursos naturais; é a maior responsável pela emissão de gases de efeito de estufa incluindo cerca de 1.8 Gt de CO₂/ano; e necessita de enormes quantidades de energia, correspondendo entre 12 a 15% da energia industrial utilizada. O cimento também não é utilizado da forma mais adequada, pois 40% do consumo de betão deve-se à reparação e renovação das construções, o que torna as estruturas de betão pouco eficientes devido à sua relativamente baixa durabilidade. Contudo, no futuro, o betão poderá e deverá evoluir no sentido de melhorar a sua eco-eficiência, utilizando menor quantidade de cimento na sua composição, substituindo-o por elevado volume de adições minerais, nomeadamente cinzas volantes. No entanto, a tecnologia atual não permite que este tipo de betão seja eficiente, pois a sua durabilidade a longo prazo pode estar comprometida. De facto, com o aumento da dosagem de adições minerais, os componentes alcalinos da pasta são consumidos na reação pozolânica, podendo comprometer a camada passivante, protetora das armaduras, ficando o betão vulnerável à carbonatação. Este artigo explora uma metodologia promissora para a mitigação deste problema, que consiste na adição criteriosa de cal hidratada na composição do betão, realçando as sinergias dos seus componentes, para que este resista à carbonatação. Propõe-se, assim, fabricar um betão de elevado volume de cinzas volantes, com pouco cimento mas de elevada vida útil: um betão eficiente e sustentável. Neste contexto, desenvolveu-se uma campanha experimental com o objetivo de caracterizar o comportamento de betão de elevado volume de cinzas volantes, nomeadamente no que diz respeito à sua durabilidade. Os resultados serão apresentados e devidamente analisados.

Introdução

A corrosão das armaduras de aço inseridas no betão é uma das formas de dano mais grave e frequente nas estruturas dos edifícios [1-5], sendo no caso das estruturas de betão armado, o principal veículo para a sua degradação e consequente diminuição da sua vida útil [5-10]. Além dos danos provocados nas construções, é necessário adicionar os custos económicos da reabilitação, bem como os prejuízos sociais e operacionais. Se a corrosão não for detetada e tratada, o betão ficará mais exposto aos agentes agressores, proporcionando o aparecimento de mais danos, com o consequente agravamento das patologias, podendo mesmo diminuir drasticamente o desempenho de betão e a sua longevidade [7]. A carbonatação é precisamente uma das origens de corrosão mais importante que ocorrem nas estruturas de betão armado [3, 5], podendo dizer-se, de forma simplificada, que é um caso de ataque químico no qual os agentes agressivos são os gases constituintes da atmosfera, essencialmente o dióxido de carbono

(CO₂), o dióxido de enxofre (SO₂) e o gás sulfídrico (H₂S) [5, 11, 12]. Estes, normalmente difundem-se sob a forma gasosa na solução intersticial do sistema poroso, pelas fissuras do betão ou na interface pasta-agregado, neutralizando os compostos alcalinos, podendo provocar a queda do pH para valores inferiores a nove, destruindo-se assim a proteção passiva de forma generalizada e originando corrosão [4, 13-16] (Fig. 1).

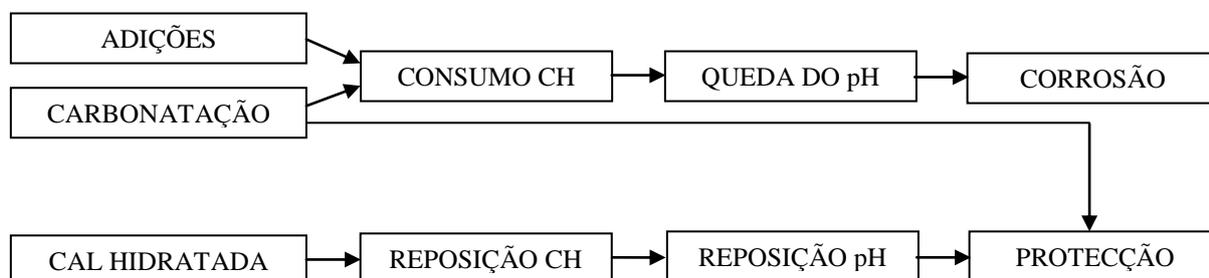


Figura 1 – Carbonatação com elevado volume de adições

Os principais compostos alcalinos presentes na pasta hidratada suscetíveis de reagir com o dióxido de carbono são os hidróxidos de potássio, de sódio e de cálcio (CH), sendo este último o mais importante (Eq. 1). Por este motivo, é uma patologia mais suscetível em zonas urbanas, industriais ou em locais com elevadas concentrações de dióxido de carbono [17], pelo que acaba por ser dominante precisamente nos meios de maior desenvolvimento da civilização.



Mas, a suscetibilidade ao ataque dos agentes exteriores também está relacionada com a qualidade do betão [18], e por estranho que pareça, o betão da era moderna poderá ser mais vulnerável do que o betão tradicional. A composição do betão tem sofrido muitos avanços tecnológicos, principalmente a partir da primeira metade do século XX. Um dos mais importantes é a capacidade de incorporar adições minerais como substituto de cimento [19]. A produção crescente de certas adições minerais, tais como as cinzas volantes, cria um problema de tratamento, armazenamento e controlo do ambiente, pelo que urge, há mais de uma década, encontrar uma solução eficaz para a sua utilização [20]. Como o betão é o segundo material mais consumido pelo Homem, superado apenas pela água [19, 21, 22], o betão é, naturalmente, um veículo atrativo para incorporar teores elevados de subprodutos industriais com vantagens técnicas, económicas e ambientais [13, 19, 22-24], sendo um paradigma do desenvolvimento sustentável da indústria do cimento e do betão [25]. Hoje em dia, na construção corrente, encontram-se betões com 20 a 40% de adições, sendo possível, em situações muito pontuais, chegar aos 70% [26]. Mas, com esta escalada no volume de adições como substituição do cimento, o fenómeno da carbonatação agrava-se [27], podendo pôr em causa as vantagens da utilização de elevados volumes de adições.

Na hidratação do cimento, dois dos primeiros compostos a hidratar são o silicato tricálcico (alite) e o silicato bicálcico (belite) (Eq. 2 e 3): estes reagem com a água, formando bissilicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e portlandite (CH). A resistência mecânica do betão deve-se essencialmente aos C-S-H, sendo que os derivados da alite são responsáveis pelas resistências nas primeiras idades, e os derivados da belite pelas resistências nas idades mais avançadas [28]. Já o CH representa cerca de 20 a 25 % do volume de sólidos da pasta de cimento hidratada, não participa na resistência, tem influência negativa na resistência ao ataque químico [29], embora confira alcalinidade ao betão [21, 30]. Na presença de adições pozolânicas, estas utilizam o CH para a sua hidratação (Eq. 4), provocando a queda da alcalinidade do betão e, portanto, aumentando a suscetibilidade à carbonatação [11] (Fig. 1), que por sua vez acelera o consumo de CH, agravando ainda mais o processo.



Este trabalho propõe adicionar artificialmente a reserva alcalina que irá ser consumida pelas cinzas volantes e pela carbonatação, incorporando cal hidratada (CH) na composição inicial, contabilizada na massa de agregado. Esta técnica aparenta apresentar duas vantagens: mais reagente para a reação pozolânica com produção de silicatos adicionais (aumento da resistência mecânica e de durabilidade), mas também maior alcalinidade para manter a camada passivante das armaduras e fornecer proteção à carbonatação perante o ataque (Fig. 1).

Programa experimental

O programa experimental focou-se no estudo das composições indicadas na Tabela 1. A mistura de referência adotada pretende ser equivalente à argamassa contida num betão de elevado desempenho, autocompactável com 500 kg/m^3 de cimento, 731 kg/m^3 de agregado e uma razão água/ligante (A/L) de 0.25.

Para cada mistura realizaram-se 3 amassaduras com 3 razões A/L diferentes e uma dosagem de 1,7% de superplastificante (SP), relativa à massa de ligante. O total de massa ligante (L) refere-se ao somatório de massas do cimento (C), cinzas volantes (CV) e metacaulino (MTK). A cal hidratada C_{HID} foi contabilizada na massa de agregado, juntamente com a areia (M). Foram elaborados provetes $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, para todas as composições, para ensaios de carbonatação acelerada. Após a amassadura e antes da moldagem, avaliou-se trabalhabilidade por intermédio da realização do ensaio de espalhamento [31]. Os provetes mantiveram-se em cura em água saturada de CH durante 38 dias [32] e, seguidamente, foram submetidos em estufa a um ambiente com $40 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura durante dois dias. Posteriormente, realizou-se um ensaio de resistividade elétrica, após o qual duas faces opostas e os dois topos dos provetes foram selados com parafina, dando entrada na câmara climática de carbonatação com $4 \pm 0.5\%$ de CO_2 , $55 \pm 5\%$ de HR e a $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Aí permaneceram durante 100 dias, posteriormente foram partidos e pulverizados com indicador de timolftaleína (Fig. 2 (esq)).

Foram também produzidos provetes $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, para ensaio de absorção por capilaridade, realizados de acordo com a EN 1015-18 [32] e provetes cúbicos com 50 mm de aresta para o ensaio de absorção por imersão (assinalados com * na Tabela 1), realizados de acordo com a especificação E394 [33]. Estes ensaios foram realizados com provetes carbonatados e não carbonatados, pelo que metade destes provetes foi submetida, também, à câmara climática de carbonatação durante 100 dias e outra metade permaneceu em cura em água saturada de CH. Os provetes para ensaio de absorção por capilaridade foram preparados para a câmara climática, com parafina em todas as faces exceto na zona de fratura, a única que ficará em contacto com o CO_2 (Fig. 2 (dir)).

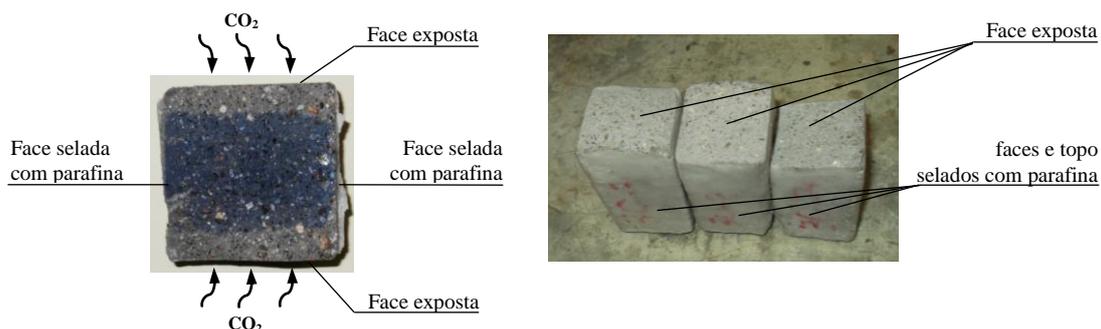


Figura 2 – Selagem com parafina. Avaliação da carbonatação (esq) e capilaridade (dir)

Tabela 1 – Composições estudadas

| Designação | A/L | Materiais | | | | | | | |
|----------------------------|------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|--|---------------------------|---------------------------|----------------|
| | | L [kg/m ³] | C [kg/m ³] | CV [kg/m ³] | MTK [kg/m ³] | C _{HID} [kg/m ³] | M [kg/m ³] | A [kg/m ³] | SP [%L] |
| I 100C * | 0.25 | 856 | 856 | 0 | 0 | 0 | 1252 | 214 | 1.70 |
| | 0.30 | 856 | 856 | 0 | 0 | 0 | 1141 | 257 | 1.70 |
| | 0.35 | 856 | 856 | 0 | 0 | 0 | 1029 | 300 | 1.70 |
| II 50C+50CV * | 0.25 | 856 | 428 | 428 | 0 | 0 | 1151 | 214 | 1.70 |
| | 0.30 | 856 | 428 | 428 | 0 | 0 | 1040 | 257 | 1.70 |
| | 0.35 | 856 | 428 | 428 | 0 | 0 | 928 | 300 | 1.70 |
| III 50C+50CV+2,5Cal | 0.25 | 856 | 257 | 599 | 0 | 21.4 | 1126 | 214 | 1.70 |
| | 0.30 | 856 | 257 | 599 | 0 | 21.4 | 1015 | 257 | 1.70 |
| | 0.35 | 856 | 257 | 599 | 0 | 21.4 | 903 | 300 | 1.70 |
| IV 50C+50CV+5Cal | 0.25 | 856 | 257 | 599 | 0 | 42.8 | 1101 | 214 | 1.70 |
| | 0.30 | 856 | 257 | 599 | 0 | 42.8 | 990 | 257 | 1.70 |
| | 0.35 | 856 | 257 | 599 | 0 | 42.8 | 878 | 300 | 1.70 |
| V 50C+50CV+10Cal | 0.25 | 856 | 257 | 599 | 0 | 85.6 | 1051 | 214 | 1.70 |
| | 0.30 | 856 | 257 | 599 | 0 | 85.6 | 940 | 257 | 1.70 |
| | 0.35 | 856 | 257 | 599 | 0 | 85.6 | 828 | 300 | 1.70 |
| VI 50C+50CV+15Cal * | 0.25 | 856 | 428 | 428 | 0 | 128 | 1002 | 214 | 1.70 |
| | 0.30 | 856 | 428 | 428 | 0 | 128 | 890 | 257 | 1.70 |
| | 0.35 | 856 | 428 | 428 | 0 | 128 | 779 | 300 | 1.70 |
| VII 50C+50CV+20Cal | 0.25 | 856 | 257 | 599 | 0 | 171.2 | 952 | 214 | 1.70 |
| | 0.30 | 856 | 257 | 599 | 0 | 171.2 | 840 | 257 | 1.70 |
| | 0.35 | 856 | 257 | 599 | 0 | 171.2 | 728 | 300 | 1.70 |
| VIII 50C+50CV+30Cal * | 0.25 | 856 | 428 | 428 | 0 | 257 | 852 | 214 | 1.70 |
| | 0.30 | 856 | 428 | 428 | 0 | 257 | 740 | 257 | 1.70 |
| | 0.35 | 856 | 428 | 428 | 0 | 257 | 628 | 300 | 1.70 |
| IX 30C+70CV * | 0.25 | 856 | 257 | 599 | 0 | 0 | 1111 | 214 | 1.70 |
| | 0.30 | 856 | 257 | 599 | 0 | 0 | 999 | 257 | 1.70 |
| | 0.35 | 856 | 257 | 599 | 0 | 0 | 887 | 300 | 1.70 |
| X 30C+70CV+15Cal * | 0.25 | 856 | 257 | 599 | 0 | 128 | 961 | 214 | 1.70 |
| | 0.30 | 856 | 257 | 599 | 0 | 128 | 850 | 257 | 1.70 |
| | 0.35 | 856 | 257 | 599 | 0 | 128 | 738 | 300 | 1.70 |
| XI 30C+70CV+30Cal * | 0.25 | 856 | 257 | 599 | 0 | 257 | 811 | 214 | 1.70 |
| | 0.30 | 856 | 257 | 599 | 0 | 257 | 700 | 257 | 1.70 |
| | 0.35 | 856 | 257 | 599 | 0 | 257 | 588 | 300 | 1.70 |
| XII 50C+40CV+10MTK | 0.25 | 856 | 428 | 342 | 86 | 0 | 1156 | 214 | 1.70 |
| | 0.30 | 856 | 428 | 342 | 86 | 0 | 1044 | 257 | 1.70 |
| | 0.35 | 856 | 428 | 342 | 86 | 0 | 933 | 300 | 1.70 |
| XIII 40C+55CV+5MTK | 0.25 | 856 | 342 | 471 | 43 | 0 | 1133 | 214 | 1.70 |
| | 0.25 | 856 | 342 | 428 | 86 | 0 | 1136 | 214 | 1.70 |
| | 0.30 | 856 | 342 | 428 | 86 | 0 | 1024 | 257 | 1.70 |
| XIV 40C+50CV+10MTK | 0.35 | 856 | 342 | 428 | 86 | 0 | 912 | 300 | 1.70 |
| | 0.25 | 856 | 428 | 342 | 86 | 85.6 | 1056 | 214 | 1.70 |
| | 0.30 | 856 | 428 | 342 | 86 | 85.6 | 944 | 257 | 1.70 |
| XV 50C+40CV+10MTK+10Cal | 0.35 | 856 | 428 | 342 | 86 | 85.6 | 833 | 300 | 1.70 |

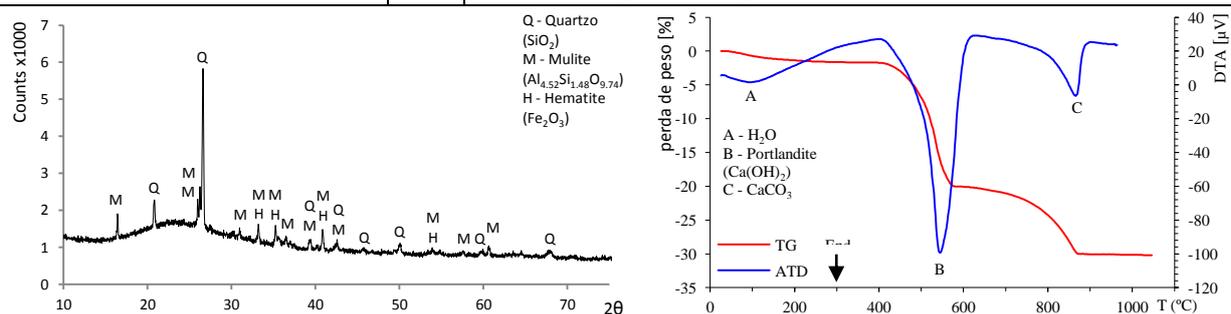


Figura 3 – DRX da cinza volante (esq) e ATS da cal hidratada (dir)

Tabela 2 - Características dos materiais

| | CEM I 42.5R | CV | | | CAL Hid CALCIDRATA | MTK MIBAL C |
|---------------------------------------|----------------|-------|-------|---------------|-----------------------|----------------|
| <i>Propriedades químicas [%]</i> | [34] | FRX | MEV | DRX | ATS/DRX [35] | [36, 37] |
| SiO ₂ | 18.27 | 49.12 | 56.83 | 28.7 vítreo * | < 0.4 [35] | 47.0 |
| Al ₂ O ₃ | 4.75 | 27.30 | 28.59 | 22.1 vítreo * | < 0.5 [35] | 37.1 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.23 | 8.19 | 6.86 | 4.8 vítreo * | < 0.08 [35] | 1.3 |
| CaO | 63.94 | 2.36 | 1.80 | | | 0.1 |
| CaO livre | 1.39 | | | | | |
| MgO | 1.31 | 1.42 | | | < 0.85 [35] | 0.15 |
| SO ₃ | 3.05 | 1.30 | | | | |
| K ₂ O | 0.57 | 3.34 | 1.97 | | | 2 |
| Na ₂ O | | 0.99 | 1.78 | | | 0.2 |
| TiO ₂ | | 2.32 | | | | 0.3 |
| Cl ⁻ | 0.09 | | | | | |
| Outros | | | | 15.4 vítreo * | | |
| Teor Carbono | | | 3.65 | | | |
| Perda ao fogo | 2.72 | 3.97 | | | | 12.75 |
| Resíduo insolúvel | 0.74 | | | | | |
| <i>Propriedade físicas</i> | | | | | | |
| Massa volúmica [kg/m ³] | 3100 | | 2420 | | < 0.08 [35] | 2590 |
| Sup.esp. Blaine [cm ² /g] | 4315 | | | | | |
| <i>Propriedades mineralógicas [%]</i> | | | | | | |
| Quartzo | | | | 18.41 | | |
| Mulite | | | | 7.18 | | |
| Hematite | | | | 3.41 | | |
| Total fase cristalina * | | | | 29.00 | | |
| Total fase vítrea | | | | 71.00 | | |
| Portlandite | | | | | 75.8 | |
| Calcite | | | | | 22.6 | |
| * Metodologia Rietveld | | | | | | |

O cimento utilizado foi do tipo CEM I 42.5R, proveniente do centro de produção do Outão da Secil, o agregado foi constituído por areia comercial rolada 0/4 proveniente de rio, e um superplastificante de última geração com base numa cadeia de éter policarboxílico modificado, da marca BASF, referência Glenium Sky 617. Dada a importância da caracterização das cinzas volantes, foi realizado um ensaio de difração de raios X (DRX) com um equipamento Bruker D8 Advance (Fig. 3 (esq.)) e uma espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) com um equipamento Philips X' Unique II, de forma a quantificar as fases reativas pela metodologia de Rietveld. Foi ainda utilizado um microscópio eletrónico de varrimento Hitachi SU1510 (MEV) para avaliar a qualidade das cinzas volantes, verificando-se que são essencialmente constituídas por cenosferas, encontrando-se uma pequena percentagem aprisionadas em aglomerados de carbono (Fig. 4). Para caracterizar o potencial em CH da cal hidratada e a quantidade de carbonato de cálcio presente, adotou-se análises térmicas simultâneas (ATS) em equipamento Netzsch 402 EP, com uma velocidade de aquecimento de 10 °C/min (Fig. 3 (dir.)), acrescido de uma análise de DRX para determinar a forma de cristalização do carbonato de cálcio. As características dos materiais estão descritas na Tabela 2.

Da análise da Fig. 3 e da Tabela 2, verificou-se que as principais fases cristalinas das cinzas volantes são quartzo, mulite e hematite. Para além destas fases, ficou evidenciada a existência de uma quantidade significativa de fase vítrea que se estima em cerca 71% (28.7+22.1+4.8+15.4), com um teor de carbono de 3.65%, o que indicia uma reatividade razoável das cinzas volantes.

Prevê-se assim, que a par do efeito pozolânico se verifique uma influência importante do efeito fíler.

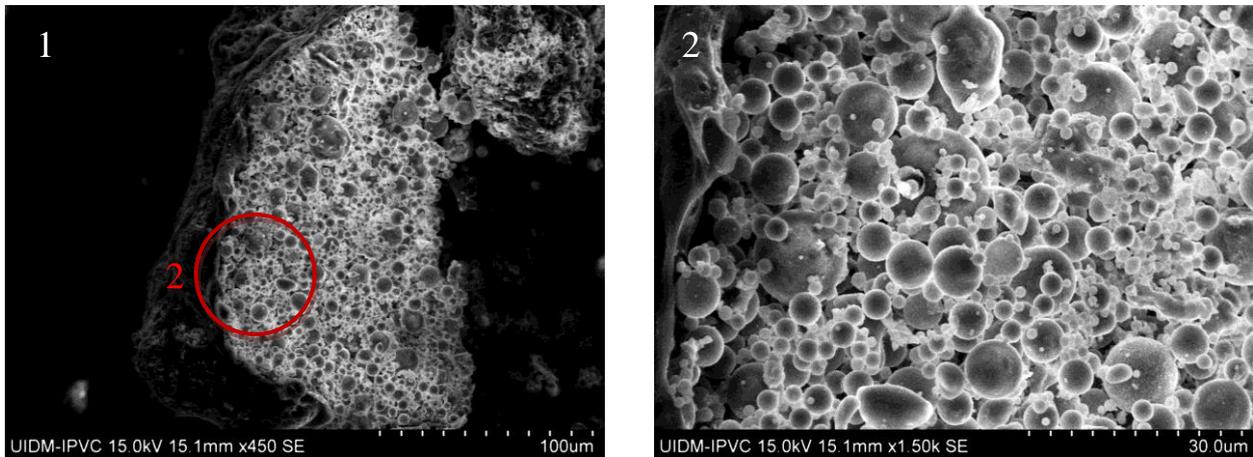


Figura 4 – imagem das cinzas volantes obtidas por MEV

A observação da Fig. 3 (dir) referente à cal hidratada mostrou a existência de alguma água livre identificada nas temperaturas iniciais (pico A), a decomposição da portlandite entre os 410 e 620 °C (pico B) e a decomposição do carbonato de cálcio entre os 620 °C e os 965 °C (pico C). A pureza da cal hidratada não é muito elevada (75,8%), mas expectavelmente é a suficiente para reagir com as cinzas volantes utilizadas, potenciando a ação pozolânica e fornecendo alcalinidade adicional para repor o pH.

Apresentação e análise de resultados

Trabalhabilidade

De acordo com a Fig. 5, algumas misturas não apresentaram trabalhabilidade adequada ou apresentaram segregação (IX-c), pelo que foram rejeitadas. Ficou patente que adição de cinzas volantes incrementa a trabalhabilidade enquanto a adição de cal a faz diminuir. Esta quebra é de tal forma que já não foi possível fabricar uma mistura de 50% de cinzas volantes com 15% de cal hidratada (composição VI-a). Tal é indicador que para grandes quantidades de adição de cal hidratada pode ser necessário sacrificar a trabalhabilidade.

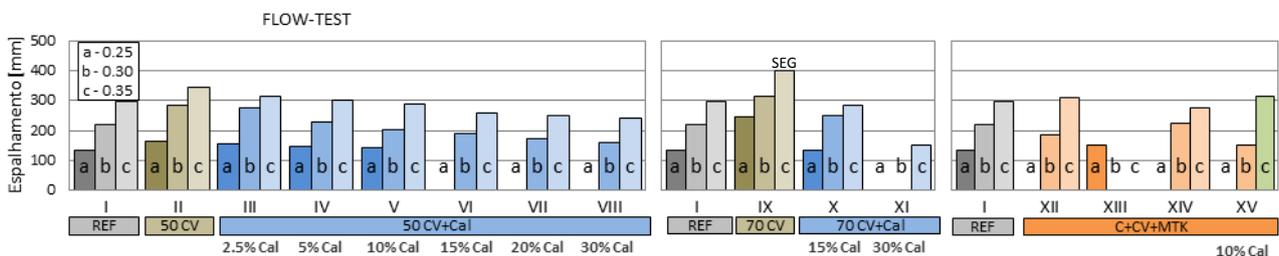


Figura 5: Trabalhabilidade

Resistividade elétrica

A resistividade elétrica apresentada corresponde ao valor médio registado em medições nas 4 faces maiores dos provetes 40x40x160 mm³. Foi utilizado um resistímetro com 38 mm de espaçamento entre sondas. De acordo com os resultados (Fig. 6), a utilização das adições incrementou a resistividade elétrica, principalmente nas misturas com metacaulino e nas misturas ternárias com 50% de cinzas volantes e cal em quantidades moderadas (até 10% inclusive). Tal facto poderá

dever-se à maior compacidade das misturas na presença das adições o que se traduz numa maior dificuldade na difusão do agente agressor, aumentando, assim a durabilidade de todas as composições quando comparadas com as de referência, produzidas sem adições.

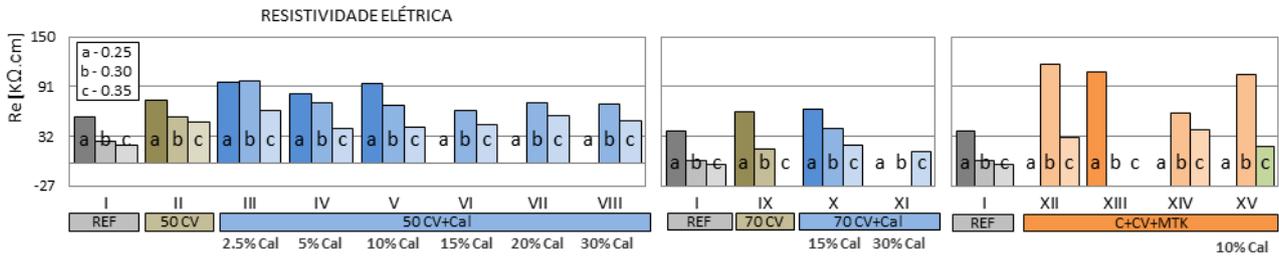


Figura 6: Resistividade elétrica aos 40 dias

Carbonatação

Verificou-se que a profundidade de carbonatação foi superior nas misturas contendo adições, sendo mais evidente com a utilização de cinzas volantes (Fig. 7). Tal deve-se ao consumo do CH. A introdução de cal hidratada acarreta menores profundidades de carbonatação, principalmente para quantidades moderadas (até 10%) e baixa razão A/L. Tal pode dever-se ao facto da sílica vítrea das cinzas volantes terem reagido na totalidade, pelo que o excedente de cal embora contribua para a manutenção do pH, não contribuiu para a produção de C-S-H adicional e para o consequente adensamento da matriz. A utilização de cal hidratada em composições com razões A/L mais elevadas não produziu efeitos positivos, podendo estar associados a uma menor compacidade das argamassas ou a ocorrência de alguma lixiviação durante o período de cura.

A utilização da metacaulino não foi tão eficaz, provavelmente porque este consumiu, juntamente com as cinzas, ainda mais CH ou porque o eventual aumento da densidade da matriz associado ao uso de metacaulino não foi suficiente para impedir a difusão do CO₂.

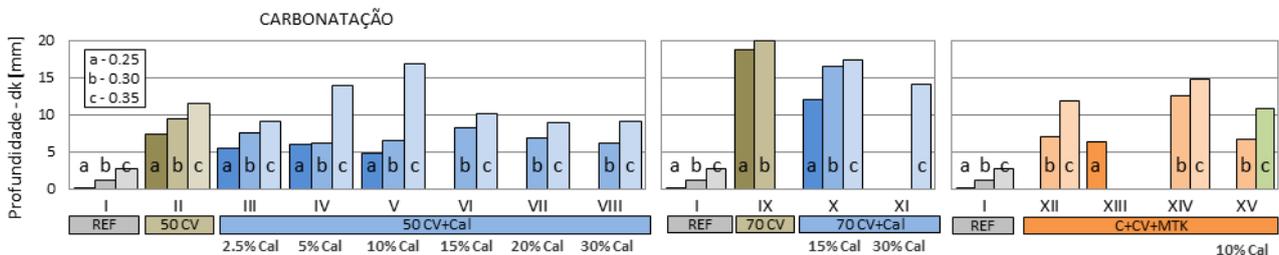


Figura 7: Profundidade de carbonatação

Absorção de água por imersão e por capilaridade

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão permitiram avaliar a porosidade aberta (Fig. 8). O ensaio de absorção de água por capilaridade possibilitou a quantificação do coeficiente de absorção capilar, determinado recorrendo ao método dos mínimos quadráticos, considerando apenas os 10 e 90 minutos de ensaio (Fig. 9). Este indicador refere-se à relação entre a massa de água absorvida por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo.

Conforme se pode constatar, quer a porosidade aberta, quer o coeficiente de absorção capilar aumentou com o recurso a adições. A utilização de adições altera a porimetria e a porosidade, podendo dar-se um aumento dos microporos e uma diminuição dos macroporos [11], o que pode explicar o aumento do coeficiente de absorção capilar. Além disso, a presença de uma grande quantidade de finos inertes, sem reatividade pozolânica também aumenta este coeficiente de absorção capilar [38], que é congruente com reatividade das cinzas volantes utilizadas. A porosidade total tende a aumentar com as adições, porque a principal responsabilidade pela

diminuição dos vazios da matriz advém da hidratação do cimento [27]. A cal hidratada e as cinzas volantes terão, provavelmente, mais responsabilidade no refinamento dos poros.

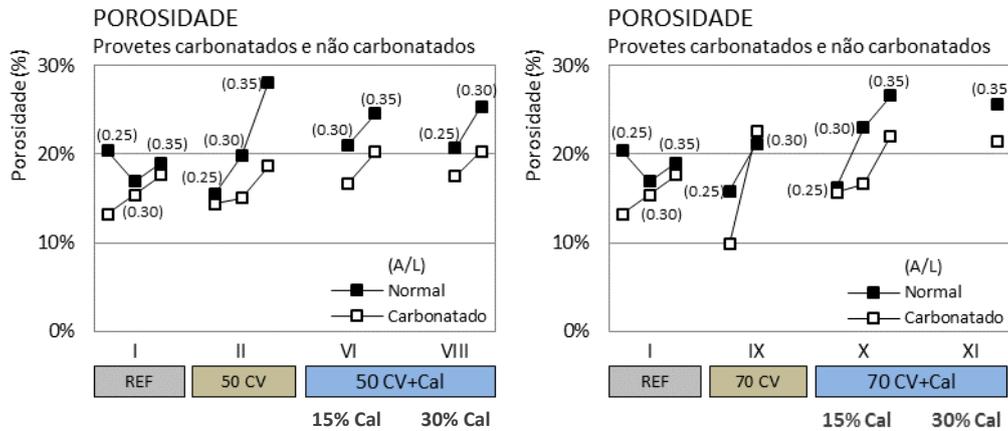


Figura 8: Absorção de água por imersão (porosidade aberta)

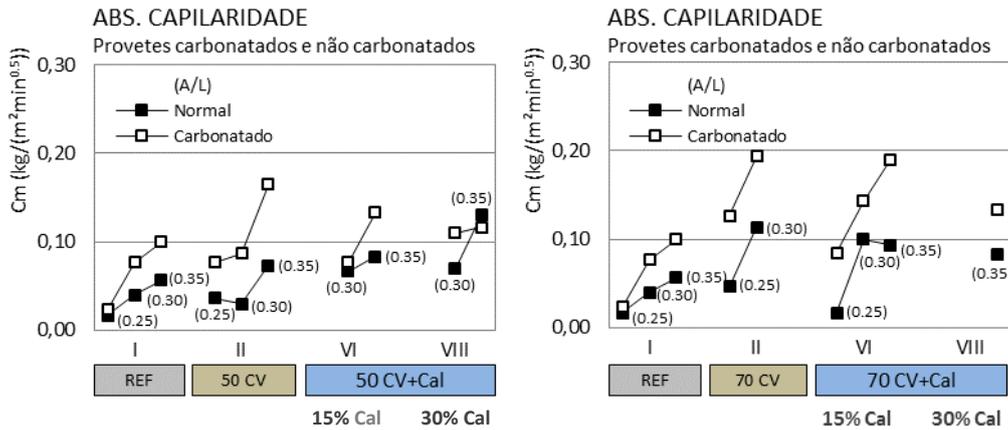


Figura 9: Absorção de água por capilaridade

Nos provetes carbonatados (com ou sem adições) a porosidade aberta foi inferior, tendo um comportamento inverso no coeficiente de absorção capilar. Como a densidade do carbonato de cálcio é superior à do CH, pode dar-se um aumento da fase sólida, que segundo Younsi [13] poderá ir dos de 3 aos 19%. Por outro lado, caso não exista espaço na matriz para acomodação deste aumento, poderá haver lugar a microfissuração [39], o que poderia explicar o aumento do coeficiente de absorção capilar. O aumento de microporos também explica consistentemente o aumento do coeficiente de absorção capilar com a carbonatação, pois existem mais poros e com menor raio.

A cinética do coeficiente de absorção capilar ao longo do tempo, expressa na Fig. 10, para as composições (I, II, VIII, IX e XI), foi marcada por uma grande diferença entre os provetes carbonatados e não carbonatados. Estes últimos apresentaram desenvolvimentos visivelmente superiores. Exceção única para as composições com 50% de cinzas volantes e 15% de cal (VI), cuja diferença é bastante ténue (Fig. 10). Tal pode dever-se a uma matriz mais compacta fornecida pela cal, restringindo assim a criação de produtos de carbonatação. Sabendo que o coeficiente de absorção capilar pode ser fortemente influenciado por zonas de fratura, principalmente na zona da interface [38], a cicatrização desta zona por carbonatação, principalmente na presença de portlandite disponível, poderia também explicar este resultado: aumento do coeficiente de absorção capilar devido à diminuição do raio dos poros, mas ao mesmo tempo deu-se um aumento da formação de C-S-H adicional que obstruiu a rede capilar.

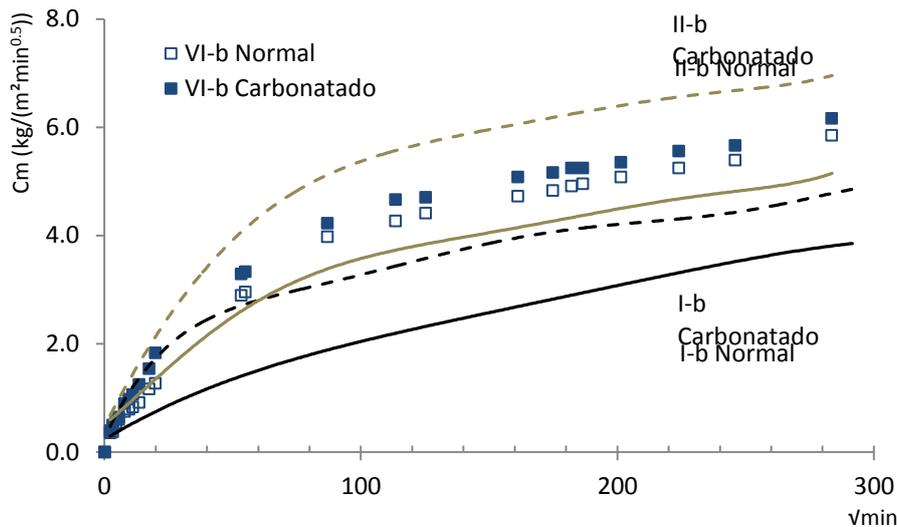


Figura 10: Cinética de absorção de água por capilaridade

Conclusão

A incorporação de cal hidratada poderá ser uma ferramenta com potencialidades para desenvolver a resistência à carbonatação de betões de elevado volume de cinzas volantes e produzir betões ecológicos eficientes e duráveis. Embora a composição química seja semelhante ao CH resultante da hidratação do cimento, a introdução artificial de CH na composição das amassaduras altera a cinética da reação, principalmente porque uma grande quantidade dos reagentes se encontra presente desde o início da reação e não ao longo da sua maturidade (Eq. 2 a 4).

Para valores modestos de cal hidratada, até 10%, obtiveram-se os melhores resultados. Esta pequena quantidade pode estar relacionada com a qualidade das cinzas volantes, nomeadamente a quantidade de sílica amorfa. Mas uma outra explicação poderá ser dada pela melhor sinergia conseguida, pois grandes quantidades de CH permitem o aumento do pH, mantêm ativa a camada passivante das armaduras e fornecem proteção contra a corrosão. Mas por outro lado, se o teor de CH adicionado no início da amassadura for demasiadamente elevado, essa excessiva presença pode ser prejudicial, uma vez que a portlandite não convertida em C-S-H adicional estará sujeita a efeitos deletérios [29]. Futuros trabalhos deverão desenvolver uma metodologia que permita associar a quantidade e tipo de cinzas volantes com a quantidade ótima de cal hidratada a introduzir no início composição. Outros estudos deverão incidir sobre composições de betão de elevado desempenho ($A/L \leq 0.40$), com elevado volume de adições, mas com quantidade máxima de ligante até aos 350 kg/m^3 .

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 a Secil SA, Basf e Mota Engil SA pela amável cedência do cimento, superplastificante e das cinzas volantes, respetivamente.

Referências

- [1] Helene, P., *Introdução*, in *Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto*, P. Helene, Editor. 2008, Degussa Construction Chemical Brasil: São Paulo.

- [2] Khan, M.I. and C.J. Lynsdale, *Strength, permeability, and carbonation of high-performance concrete*. Cement and Concrete Research, 2002. **32**(1): p. 123-131.
- [3] Rincón, O., et al., eds. *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. 1997, CYTED (Programa Iberoamericano de Ciência y Tecnologia para el Desarrollo: Habana.
- [4] Broomfield, J.P., *Corrosion of steel in concrete: understanding investigation and repair*. 1997, London: E & FN Spon.
- [5] Polito, G., *Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação*, in *Engenharia civil*. 2006, Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte.
- [6] Lee, H.J., et al., *A study for carbonation degree on Concrete using a phenolphthalein indicator and fourier-transform infrared spectroscopy*. International Journal of Civil and Environmental Engineering, 2012. **34**(62): p. 184-190.
- [7] Torgal, F.P., et al., *An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: evaluation, use of SCMs and/or RAC*. Construction and Building Materials, 2012. **36**(0): p. 141-150.
- [8] Gonen, T. and S. Yazicioglu, *The influence of compaction pores on sorptivity and carbonation of concrete*. Construction and Building Materials, 2007. **21**(5): p. 1040-1045.
- [9] Thiery, M., *Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires: prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques*, in *Engenharia civil*. 2005, Ecole des Ponts ParisTech.
- [10] Monteiro, I., *Modelação da evolução da carbonatação em elementos de betão armado*, in *Engenharia civil*. 2010, Instituto Superior Técnico: Lisboa.
- [11] Hoppe, A., *Carbonatação em concreto com cinza de casca de arroz sem moagem*, in *Engenharia civil*. 2008, Universidade Federal de Santa Maria: Santa Maria.
- [12] Casore, W., *Estudo da carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada*, in *Engenharia civil*. 2008, Universidade Federal de Santa Maria: Santa Maria.
- [13] Younsi, A., *Carbonatation de bétons à forts taux de substitution du ciment par des additions minérales*, in *Engenharia civil*. 2011, Université de la Rochelle.
- [14] Villain, G., M. Thiery, and G. Platret, *Measurement methods of carbonation profiles in concrete: thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry*. Cement and Concrete Research, 2007. **37**(8): p. 1182-1192.
- [15] Khunthongkeaw, J., S. Tangtermsirikul, and T. Leelawat, *A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete*. Construction and Building Materials, 2006. **20**(9): p. 744-753.
- [16] Figueiredo, E.P., et al., *Orientação para o diagnóstico*, in *Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto*, P. Helene, Editor. 2008, Degussa Construction Chemical Brasil: São Paulo.
- [17] Papadakis, V.G., *Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress*. Cement and Concrete Research, 2000. **30**(2): p. 291-299.
- [18] IPQ, *NP EN 206-1:2007, in Betão. Parte 1: especificação, desempenho, produção e conformidade*. 2007, IPQ (Instituto Português da Qualidade): Caparica.
- [19] Isaia, G.C. and A.L.G. Gastaldini, *Concrete sustainability with very high amount of fly ash and slag*. IBRACON structures and materials journal, 2009. **2**(3 (September)): p. 244-253.
- [20] Hwang, K.R., T. Noguchi, and F. Tomosawa. *Effects of fine aggregate replacement on the rheology, compressive strength and carbonation properties of fly ash and mortar*. in *6th International conference on the use of fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete*. 1998. Bangkok: ACI SP-178,.
- [21] Sabir, B.B., S. Wild, and J. Bai, *Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review*. Cement and Concrete Composites, 2001. **23**(6): p. 441-454.

- [22] Isaia, G.C. and A.L.G. Gastaldini, *Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um caso de estudo*. Ambiente Construído, 2004. **4**(2): p. 19-30.
- [23] Dal Ri, M., *Efeitos da adição da cal hidratada em concretos com altos teores de adição mineral na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto*, in *Engenharia civil*. 2002, Universidade Federal de Santa Maria: Santa Maria
- [24] Younsi, A., et al., *Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content*. Cement and Concrete Composites, 2011. **33**(10): p. 993-1000.
- [25] Mehta, P.K. *Role of pozzolanic and cementitious material in sustainable development of the concrete industry*. in *6th International conference on the use of fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete*. 1998. Bangkok: ACI SP-178.
- [26] Metha, P.K. and P. Monteiro, *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3.^a ed. 2008, São Paulo: IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto).
- [27] Filho, J., *Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto*, in *Engenharia civil*. 2008, Universidade de São Paulo.
- [28] Neville, A., *Properties of concrete*. 3rd ed. 1994, Singapore: Longman Scientific & Technical.
- [29] Anjos, M., et al., *Avaliação da hidratação de pastas cimentícias com elevados teores de adições minerais*. 2013.
- [30] Coutinho, A., *Fabrico e propriedades do betão*. 4.^a ed. Vol. I. 2006, Lisboa: LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil).
- [31] CEN, *EN 1015-3: 2004*, in *Methods of test for mortar for masonry - part 3: determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. 2004, CEN (European Committee for Standardization): Brussels.
- [32] CEN, *EN 1015-18:2002*, in *Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar (english version)*. 2002, CEN (European Committee for Standardization): Lisboa.
- [33] LNEC, *E 394:1993*, in *Determinação da absorção de água por imersão*. 1993, LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil): Lisboa.
- [34] SECIL, *Cimento Portland EN 197-1 CEM I 42.5: resultados do autocontrolo*. 2013, SECIL - Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A.: Outão.
- [35] Calcidrata, *Ficha de especificação de produto: cal hidratada, classe 1, Grau A, Tipo 1, segundo a norma EN 12518: 2008*. 2010, Calcidrata - indústrias de cal, SA.
- [36] Pinto, A.T., *Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina do metacaulino*, in *Engenharia Civil*. 2004, Universidade do Minho: Guimarães.
- [37] Reis, R., *Betões eco-eficientes com cinzas volantes e metacaulino*, in *Engenharia civil*. 2009, Universidade do Minho: Guimarães.
- [38] Coutinho, A. and A. Gonçalves, *Fabrico e propriedades do betão*. 2.^a ed. Vol. III. 1994, Lisboa: LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil).
- [39] Abreu, A., *Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante*, in *Engenharia civil*. 2004, Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, RS.