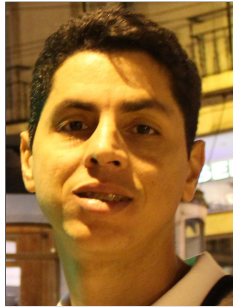


AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM REDUZIDO TEOR DE CIMENTO E ELEVADOS TEORES DE ADIÇÕES MINERAIS



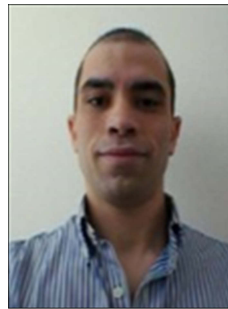
M. ANJOS
 Prof. Tecnologia da construção
 IFRN
 Natal; Brasil
 marcos.anjos@ifrn



A. CAMÕES
 Prof. Auxiliar
 CTAC – Universidade do Minho
 Guimarães; Portugal
 aires@civil.uminho.pt



C. JESUS
 Eng.º Civil
 UMinho
 Guimarães; Portugal
 cjesus@civil.uminho.pt



P. CAMPOS
 Eng.º Civil
 UMinho
 Guimarães; Portugal
 pcampos27@gmail.com

RESUMO

A indústria de concreto é uma grande consumidora de recursos naturais, seja para a produção de agregados, ou para a produção de cimento Portland, onde grandes quantidades de calcário são extraídas. Além disso, a indústria do cimento tem uma grande contribuição na emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa, portanto iniciativas que busquem reduzir o consumo de cimento nos concretos são importantes para a sustentabilidade das construções. Este trabalho avalia parâmetros de durabilidade de concretos autoadensáveis (CAA) com baixo consumo de cimento e elevados teores de cinza volante e metacaulim, com e sem a adição de cal, em comparação a dois concretos sem adições. Foram avaliados CAA com consumos de cimento entre 150 e 200 kg por m³ de concreto. Os ensaios realizados foram de resistividade, difusão de íons cloreto (LNEC E-463/2004), carbonatação acelerada e absorção por capilaridade. Os resultados demonstram a aptidão em produzir CAA com misturas terciárias e quaternárias com baixo consumo e que atendam as resistências correntes aos 28 dias (30 a 40 MPa), proporcionando ainda ganhos acentuados na durabilidade e elevadas resistências aos 90 dias.

1. INTRODUÇÃO

A produção mundial de cimento portland é atualmente responsável por 7% (2,1x10⁹ toneladas) de dióxido de carbono antropogénico (CO₂) por ano, resultantes principalmente de produção de clínquer de cimento [1]. A indústria do

concreto é responsável pelo consumo de aproximadamente $11,5 \times 10^9$ toneladas de recursos naturais ao redor do mundo [2].

A elevada emissão de CO_2 na produção do clínquer e a maior conscientização dos danos causados pelo efeito estufa têm fomentado a pesquisa de concretos sustentáveis. As pesquisas sobre esses tipos de concretos com baixos teores de cimento não são recentes e tiveram forte crescimento na década de 80 e 90 com pesquisas sobre concretos com baixo teores de cimento e elevados teores de cinza volante [3-5].

Atualmente a pesquisas em concretos sustentáveis com baixos teores de cimento tem tido foco em concretos autoadensáveis com elevados teores de diferentes adições minerais e na análise da durabilidade desses concretos [1, 6-7], além das avaliações das emissões de CO_2 [8].

As pesquisas sobre CAA tratam desde avaliação das propriedades reológicas correlacionadas com parâmetros de dosagens e resistências, como as desenvolvidas por Okamura e Ouchi e Uysal e Yilmaz [9-10], passando por avaliação das propriedades mecânicas e durabilidade desses concretos frente ao ataque por sulfatos e carbonatação [11-13].

Esta pesquisa trata da determinação de diferentes parâmetros de durabilidade de CAA com reduzidos teores de cimento e elevados teores cinza volantes e metacaulim. Os parâmetros determinados foram absorção de água por capilaridade, difusão de íons cloreto, resistividade elétrica e carbonatação acelerada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os concretos foram produzidos com cimento Portland CEM I 42.5 (C), cinza volante (CV) classe B de acordo com a NP EN 450-1 [14], metacaulim (Mtk), cal hidratada (CalH), agregado miúdo e graúdo com dimensões máximas de 4 mm e 16 mm respectivamente, água e um superplastificante a base de policarboxilato.

2.2 Composições e moldagem

Foram produzidos cinco misturas de concretos autoadensáveis com teor de finos de 500 kg/m^3 , sendo um apenas com cimento como finos e quatro com consumo de cimento de 200 e 150 kg/m^3 e adição de cinza volante, metacaulim e cal hidratada, como mostra a tabela 1, proporcionando uma redução do cimento equivalente a 60% e 70%. A definição destes traços partiu de concretos com elevados volumes de cinza volante (HVFAC) anteriormente estudados por Camões [15]. Estes concretos tiveram seus teores de argamassa seca da mistura ajustados para atender a um dos critérios dos concretos autoadensáveis, que exigem menores teores de agregados graúdos.

Foi confeccionado ainda um concreto com 300 kg de cimento/ m^3 para ser utilizado como referência comparativa com os CAA com baixo consumo de cimento (200 e 150 kg/m^3), pois esses concretos apresentaram mesmo nível de resistência aos 28 dias.

Tabela 1 - Composições dos concretos

	L500	L300	CV	CVCH	CVMK	CVMKCH
Cim (kg/m^3)	500	300	200	200	150	150
Mtk (kg/m^3)	-	-	-	-	100	100
CV (kg/m^3)	-	-	300	300	250	250
CH (kg/m^3)	-	-	-	25	-	25
Agregado Miúdo (kg/m^3)	870	1053	870	870	870	870
Agregado Graúdo (kg/m^3)	880	867	880	880	880	880
água (kg/m^3)	200	180	170	170	170	170
Glenium Sky 27 (kg/m^3)	13,0	7,8	9,0	9,6	9,6	12,3
Ligante (CIM+CV+Mtk+CH)	500	300	500	525	500	525

Teor de argamassa do traço	60,9%	60,9%	60,9%	61,3%	60,9%	61,3%
----------------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Os concretos foram produzidos em misturadores de eixo vertical tendo sido produzido em cada amassadura um volume de 0,087 m³, sendo realizado logo após a mistura os ensaios no estado fresco. Após a realização destes ensaios foram moldados CP's cúbicos 100x100x100 mm³, 150x150x150 mm³, CP's cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura e uma viga de 600 mm largura por 700 mm comprimento e 150 mm de altura. Os concretos foram colocados em cura úmida por imersão a uma temperatura de 20±2°C até a idade pretendida para os testes.

2.3 Testes

2.3.1 Propriedades no estado fresco

Foram realizados ensaios para avaliar a autoadensabilidade das composições apresentadas na tabela 1, a saber: slump flow (T500 e espalhamento), J-ring, V-funnel e L-box com 3 barras, seguindo as recomendações da EFNARC [16].

2.3.2 Resistência à compressão

Para todas as composições os CP's foram ensaiados aos 3, 7, 14, 21, 28 e 90 dias de idade. Os resultados apresentados neste trabalho resultam da média aritmética de ensaios em três CP's 100x100x100 mm³, todos os ensaios tiveram coeficiente de variação inferior a 10%. São apresentados apenas os resultados de 28 e 90 dias, as demais idades podem ser encontradas em Anjos *et al* [7] que trata do ganho de resistência desses concretos com o tempo.

2.3.3 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado aos 28 dias de idade em três CP's (100x100x100 mm³) por cada composição estudada, seguindo a recomendação do LNEC E393 [17].

2.3.4 Difusão de cloretos

A determinação da difusão de íons cloreto foi realizada de acordo com a especificação do LNEC E-463 [18]. Para a realização deste ensaio foram utilizados três CP'S por cada composição, que foram ensaiados aos 90 dias de idade. Foram utilizados provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura, proveniente do corte de CP's cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Após o corte e lavagem dos provetes submetem-se os provetes ao ensaio de difusão de cloretos por migração em regime não estacionário

2.3.5 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica foi determinada utilizando o princípio da sonda de Wenner com quatro eléctrodos equidistantes, afastados 50 mm entre si. Foram utilizados CP's cúbicos (150x150x150mm³) na condição de saturada superfície seca, um por cada composição estudada, e a resistividade foi medida às idades de 3, 7, 14, 21 e 28 dias, através de um ensaio não destrutivo, com um equipamento da marca Proceq.

2.3.6 Carbonatação

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado de acordo com o descrito na especificação técnica FprCEN/TS 12390-12 [19]. Assim, aos 28 dias de idade, seis corpos-de-prova (100x100x100mm³) por cada composição estudada, foram retirados da câmara úmida, onde deixou-se secar à temperatura ambiente no interior do laboratório, durante 14 dias. Após esse período, esses CP's foram selados com parafina deixando duas faces opostas livres, que permitem que a carbonatação apenas ocorra nesse sentido. Depois de selados os CP's foram colocados no interior da câmara de carbonatação de modo a permitir que o ar circule livremente em volta das duas faces livres para serem carbonatadas.

A concentração utilizada foi de 4±0,5% de CO₂ em relação ao volume, temperatura de 20±2°C e umidade relativa de 55±5%. Assim, a profundidade de carbonatação foi medida por aspersão de fenolftaleína após os seguintes períodos de exposição no interior da câmara: 28, 56, 63 e 70 dias.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Propriedades do concreto no estado fresco

As propriedades de fluidez, capacidade de enchimento, viscosidade e habilidade passante dos concretos autoadensáveis foram determinadas pelos ensaios de slump flow, T500, V-funnel, J-ring e L-box e são mostradas na tabela 2 com suas respectivas classificações segundo as especificações da EFNARC [16] e ABNT/NBR 15823-1 [20].

Tabela 2 - Propriedades dos concretos no estado fresco

	Slump-flow		J-ring		V-test	L-box	Classificação EFNARC	Classificação ABNT NBR 15823
	T500 (s)	Slump-flow (mm)	T500 (s)	Slump-flow (mm)	Tempo (s)	H2/H1	Fluidez/viscosidade	Habilidade passante
L500	1.67	625	obstruiu		4.6	0.75	VS1/VF1	*
L300	4.2	500	*		*	*	*	*
CV	1.85	700	2.23	700	4.8	0.86	VS1/VF1	PJ2
CVCH	2.11	700	2.77	700	12,0	1,00	VS2/VF2	PJ1
CVMK	3.15	670	3.43	615	13.9	0.92	VS2/VF2	PJ1
CVMKCH	2.63	700	3.89	695	12.8	0.89	VS2/VF2	PJ1

* Não Realizado

O concreto L500 sem adição apresentou parâmetros aceitáveis para autoadensabilidade em termos de fluidez e viscosidade, no entanto não atende aos critérios de habilidade passante, devido a obstrução no J-ring e valor do L-box abaixo de 0,8. Ao avaliar o concreto L300 não se pretendia que atendesse aos critérios de autoadensabilidade visto que seus parâmetros de dosagem estavam em desacordo com o previsto pela EFNARC, no entanto este concreto foi usado de referência para comparação entre a durabilidade de concretos com mesma resistência aos 28 dias, no caso o L300 e os CAA com reduzidos teores de cimento (CAA-RTC).

Os concretos CVCH, CVMK e CVMKCH são classificados segundo EFNARC como VS2/VF2 apresentando moderada viscosidade. Já o traço CV é classificado como VS1/VF1, pois apresenta valores de T500 e V-funil menores que 2 e 8 segundos, respectivamente, indicando um concreto com baixa viscosidade.

Todos os traços de CAA-RTC apresentam mesma classificação de fluidez (SF2), segundo a EFNARC. Embora o traço CVMK tenha se apresentado mais coeso através de análise visual e por meio do cálculo do parâmetro Γ_c como apresentado por Anjos *et al* [7], parâmetro esse proposto por Okamura e Ouchi [9].

Os CAA-RTC apresentaram estabilidade da mistura após os ensaios ou durante a parada da mistura e habilidade passante satisfatória, sendo classificados como PA2, segunda a EFNARC [9]. No entanto, o ensaio de J-ring os traços CVCH, CVMK e CVMKCH apresentarem índice de bloqueio menor 25 mm indicam ausência de bloqueio (PJ1) e o traço CV apresentou bloqueio de 45 mm em relação ao slump-flow (PJ2).

3.2 Resistência à compressão

A tabela 3 apresenta as resistências dos concretos aos 28 e 90 dias, este é um parâmetro importante, pois ao se comparar a durabilidade de concretos deve-se considerar as classes de resistências e o consumo de cimento de cada composição. Verifica-se a importância da cal hidratada na resistência dos CAA-RTC, uma vez que esses concretos apresentam muito pouco hidróxido de cálcio livre, após 28 dias de hidratação, quando não há cal adicionada a sua composição como determinado por Anjos *et al* [21]. Desta forma a adição de cal hidratada proporciona a formação de C-S-H secundário devido ao elevado teor de material pozolânico (CV e MK) nas composições dos CAA-RTC, proporcionando assim um ganho de resistência em relação aos CAA-RTC sem a presença de cal hidratada.

Tabela 3. Resistência à compressão (Rc)

		L500	L300	CV	CVCH	CVMK	CVMKCH
Rc (MPa)	28 dias	60,1	32,1	27,8	40,9	32,6	39,9

	90 dias	62,0	34,9	37,5	58,3	38,3	46,5
--	---------	------	------	------	------	------	------

3.3 Absorção de água por capilaridade

O coeficiente de absorção de água por capilaridade (ABS_{cap}) está relacionado com a durabilidade dos concretos, uma vez que tem relação com a interconectividade e diâmetros dos poros presentes. A ABS_{cap} determinada para os CAA é apresentada na figura 1, e demonstra a importância das adições minerais nesta propriedade.

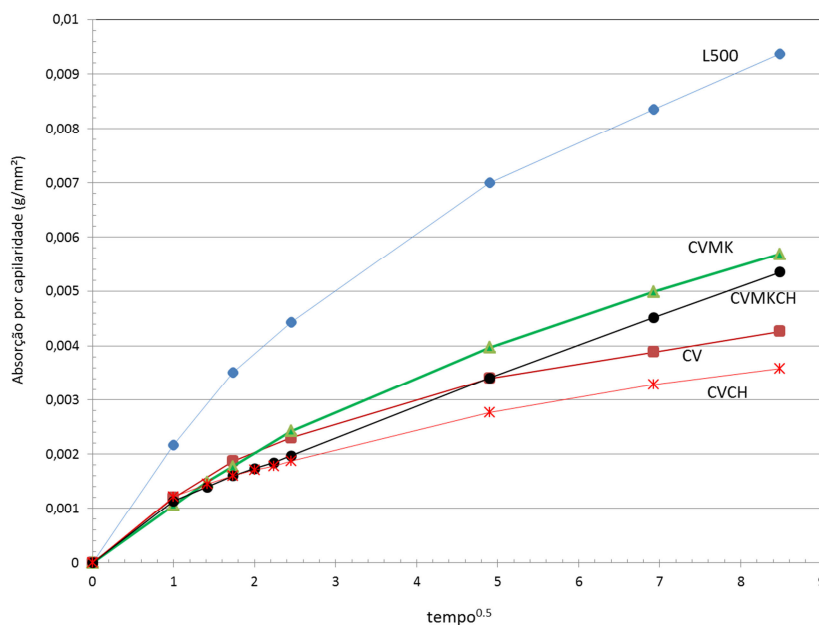


Figura 1. Absorção de água por capilaridade

3.4 Difusão de cloretos

O coeficiente de difusão de cloretos em regime estacionário é apresentado na figura 2, verifica-se que a redução do teor de cimento em 60% por CV proporciona uma diminuição do coeficiente de difusão de 54% e quando há a adição de cal hidratada (CH) essa diminuição é de 59%. Quando a redução do teor de cimento é de 70% com uso combinado de CV e MK essa diminuição passa a ser de 67% e com uso de CH a ser de 74%.

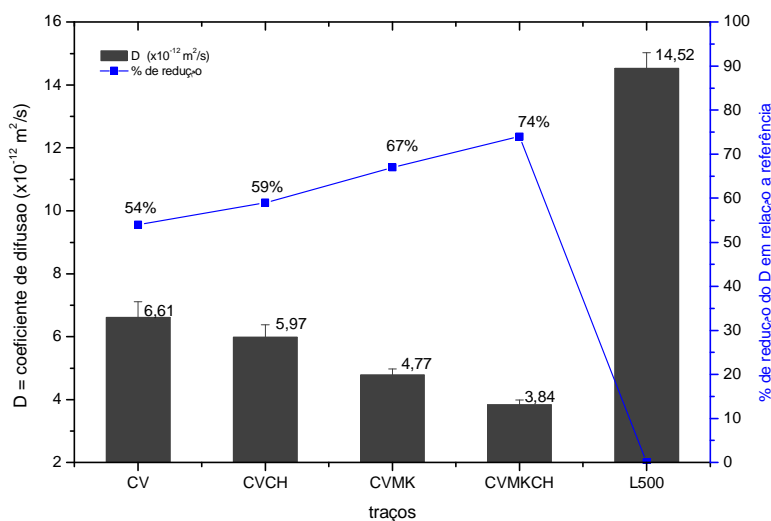


Figura 2. Difusão de íons cloreto determinado aos 28 dias de cura

O coeficiente de difusão é dependente da estrutura de poros do concreto, da interação dos cloretos com a fase aluminato do cimento hidratado e com o efeito físico dos poros que tende a fixar esses cloretos nas paredes [22]. O uso de elevados teores de CV também é relatado como positivo no combate a penetração de cloretos, sendo sempre melhor quanto maior o percentual de CV utilizado [15;23].

3.5 Resistividade elétrica

Os resultados obtidos são apresentados na figura 3 e resultam da média aritmética de quatro leituras, as quais, foram efetuadas na diagonal do corpo-de-prova e perpendicularmente entre si em duas faces distintas.

A resistividade do concreto está relacionada com o teor de água no seu interior e a conectividade dos microporos dentro de concreto [24]. Portanto, a resistividade está relacionada com a cinética da penetração de íons e consequentemente com a corrosão, sendo um índice para a qualidade e durabilidade do concreto.

Segundo [25] concretos com resistividade abaixo de $10\text{ k}\Omega$ apresentam alto risco de corrosão e moderado risco para resistividade entre de 10 e $50\text{ k}\Omega$. Verifica-se que essa condição só é atingida pelos CAA-RTC com metacaulim e depois de 14 dias de cura e para os com CV apenas após os 28 dias.

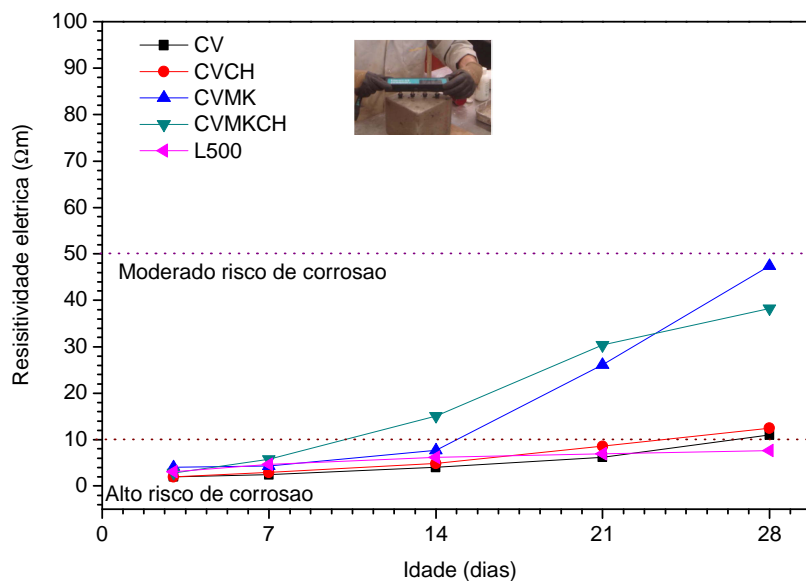


Figura 3. Resistividade elétrica dos CAA

3.6 Carbonatação

A figura 4 apresenta o avanço da carbonatação com do tempo de permanência na câmara, como esperado a profundidade de carbonatação foi menor nos traços com inclusão de cal. A partir dos dados da figura 4, é possível calcular o coeficiente de difusão acelerada para a carbonatação pela declividade das curvas quando correlacionadas com a raiz dos anos, e com esses valores determinar através da primeira lei de Fick a profundidade de carbonatação em ambiente natural [13, 26].

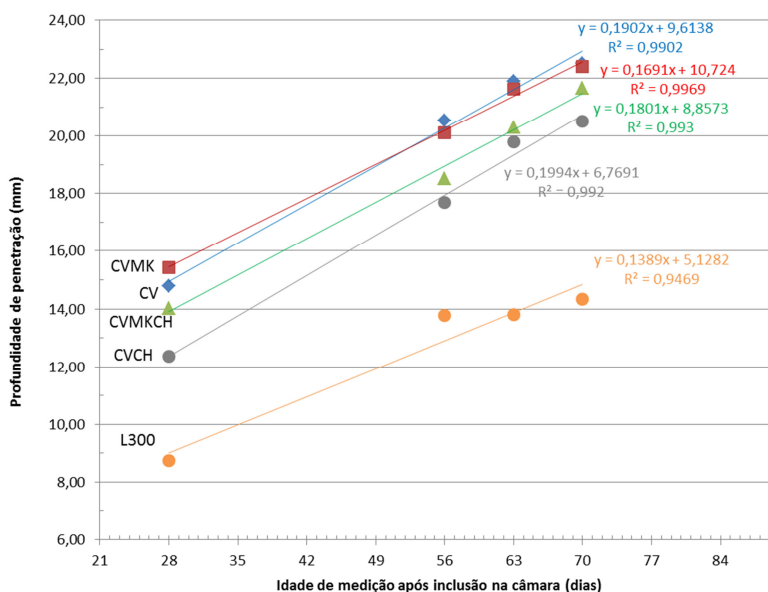


Figura 4. Relação entre as profundidades de carbonatação versus a raiz quadrada do tempo

4. CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser tiradas a partir deste estudo experimental:

- É possível produzir CAA com reduzidos consumos de cimento (150 e 200 kg/m³) com excelentes propriedades de autoadensabilidade e com resistências correntes aos 28 dias (30 e 40 MPa), além elevadas resistências aos 90 dias (46 e 58 MPa).
- O uso da cal em percentual de 5% em relação ao ligante total dos CAA-RTC proporcionou ganhos significativos na resistência à compressão aos 28 e 90 dias.
- A absorção por capilaridade dos CAA-RTC (150 e 200 kg/m³) é muito menor que o CAA de referência com 500 kg/m³, demonstrando reduções no consumo de cimento de 70 e 60% proporcionam reduções de absorção de até 62%.
- Os coeficientes de difusão de cloretos dos CAA-RTC são muito menores que os verificados para os concretos de referência 500 e 300 kg/m³.
- A carbonatação acelerada demonstra que os CAA-RTC apresentam profundidades de penetração de CO₂ maiores que o concreto de referência (300 kg/m³).

5. AGRADECIMENTOS

À CAPES/Brasil (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão de bolsa de pós-doutorado a Marcos A. S. Anjos (processo nº BEX 6517/10-2).

6. REFERÊNCIAS

- [1] Celik, K. et al. High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for portland cement in self-compacting and sustainable concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2014, v. 45, p. 136-147.
- [2] Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. Ibracon, 2008.
- [3] Ravina, D.; Mehta, P. K. Properties of fresh concrete containing large amounts of fly ash. *Cement and Concrete Research*, v. 16, n. 2, p. 227-238, 1986.
- [4] Ravina, D.; Mehta, P. Compressive strength of low cement/high fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 18, n. 4, p. 571-583, 1988.
- [5] Malhotra, V. Durability of concrete incorporating high-volume of low-calcium (ASTM class F) fly ash. *Cement and Concrete Composites*, v. 12, n. 4, p. 271-277, 1990.
- [6] Ramezani-pour, A.; Khazali, M.; Vosoughi, P. Effect of steam curing cycles on strength and durability of SCC: A case study in precast concrete. *Construction and Building Materials*, v. 49, p. 807-813, 2013.

- [7] Anjos MA, Camões A, Jesus C. Eco-Efficient Self-Compacting Concrete with Reduced Portland Cement Content and High Volume of Fly Ash and Metakaolin. *Key Engineering Materials: Trans Tech Publ*; 2015. p. 172-81.
- [8] Limbachiya M, Bostanci SC, Kew H. Suitability of BS EN 197-1 CEM II and CEM V cement for production of low carbon concrete. *Construction and Building Materials*. 2014; 71:397-405.
- [9] Okamura, H.; Ouchi, m. Self-compacting concrete. *Journal of advanced concrete technology*, v. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.
- [10] Uysal, M.; Yilmaz, K. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 7, p. 771-776, 2011.
- [11] Assie, S.; Escadeillas, G.; Waller, V. Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability. *Construction and Building Materials*, v. 21, n. 10, p. 1909-1917.
- [12] Valcuende, M.; Parra, C. Natural carbonation of self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 5, p. 848-853, 2010.
- [13] Mohammed, M. K.; Dawson, A. R.; Thom, N. H. Carbonation of filler typed self-compacting concrete and its impact on the microstructure by utilization of 100% CO₂ accelerating techniques. *Construction and Building Materials*, v. 50, p. 508-516, 2014.
- [14] EN, N. 450-1-Cinzas volantes para betão. Parte 1: definições, especificações e critérios de conformidade. Instituto Português da Qualidade, 2006.
- [15] A. Camões: Durability of High-volume fly ash concrete. *International RILEM Workshop on performance based evaluation and indicators for concrete durability*. Madrid, 2006. 311-318.
- [16] EFNARC, S. Guidelines for self-compacting concrete. February, 2002.
- [17] LNEC E393: Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade. Lisboa, 1993.
- [18] LNEC E-463: Betão – Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário, Documentação normativa, Especificação LNEC, 2004.
- [19] FprCEN/TS 12360-12: Testing hardened concrete – Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method, 2010.
- [20] ABNT/NBR 15823-1: Concreto autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco, 2010.
- [21] Anjos MA, Camões A, Jesus CM, Duarte F. Avaliação da hidratação de pastas cimentícias com elevados teores de adições minerais. *Engenharia Civil (UM)*. 2012(44):41-58.
- [22] Neithalath N, Jain J. Relating rapid chloride transport parameters of concretes to microstructural features extracted from electrical impedance. *Cement and Concrete Research*. 2010;40(7):1041-51.
- [23] Wongkeo W, Thongsanitgarn P, Ngamjarujana A, Chaipanich A. Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume. *Materials & Design*. 2014;64:261-9.
- [24] Chen C-T, Chang J-J, Yeh W-c. The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete. *Construction and Building Materials*. 2014;71:35-43
- [25] Andrade C, Alonso C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures*. 2004;37(9):623-43.
- [26] Neves R, Branco F, de Brito J. Field assessment of the relationship between natural and accelerated concrete carbonation resistance. *Cement and Concrete Composites*. 2013;41:9-15.