

Efeito do tempo e temperatura de cura em concretos autoadensáveis com reduzido teor de cimento



Marcos Anjos¹



Aires Camões²

RESUMO

Os concretos com reduzidos teores de cimento têm sido foco de crescentes estudos em virtude do seu potencial quanto a sustentabilidade das construções. Mais recentemente o estudo ascendeu aos concretos autoadensáveis com reduzidos teores de cimento. Entretanto, há uma preocupação quanto ao ganho de resistência nas primeiras idades desses concretos devido ao baixo teor de cimento e o elevado teor de adições minerais que conhecidamente proporcionam melhorias nas resistências a longas idades, notadamente acima de 90 dias. O presente trabalho tem o objetivo de avaliar o ganho de resistência e a hidratação de concretos autoadensáveis com reduzidos teores de cimento e elevados teores de cinza volante e metacaulim, com e sem adição de hidróxido de cálcio. Para tanto, os concretos foram submetidos a cura por imersão em água a temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 3, 7, 14, 21, 28, 91 e 360 dias e também cura em água aquecida a 40°C por 3 dias acrescidos de mais 3 dias a 60°C e um dia de resfriamento dentro do banho térmico até a temperatura ambiente. Foram realizados ensaios de slump flow, L-box, V-test e J-ring para caracterização do CAA no estado fresco. No estado endurecido foram realizados ensaios de resistência à compressão a idades de 3, 7, 14, 28, 90 e 360 dias, absorção por capilaridade, difração de raios X e MEV. Os resultados demonstram a aptidão em desenvolver CAA com reduzidos teores de cimento devido a excelente capacidade das cinzas volantes e metacaulim em trabalharem como agentes viscosificadores dos concretos autoadensáveis. Verifica-se que é possível produzir CAA com consumos de cimento entre 150 e 200 kg/m^3 que atinjam resistências aos 28 dias entre 25 e 40 MPa e entre 45 e 70 MPa, para cura úmida e térmica respectivamente. A partir do ensaios de MEV e DRX é possível inferir que o ganho de resistência obtido pelos CAA com cura térmica é devido a aceleração das reações pozolânicas e da estrutura interna mais densa dos concretos submetidos a cura térmica.

Palavras-chave: Concreto autoadensável, cura térmica, resistência à compressão, hidratação, microestrutura.

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Diretoria acadêmica de Construção Civil, Natal-RN, Brasil. marcos.anjos@ifrn.edu.br

² CTAC – Universidade do Minho, Guimarães; Portugal. aires@civil.uminho.pt

1. INTRODUÇÃO

Os concretos com reduzido teor de cimento também denominados de concretos ecológicos, sustentáveis ou ainda de concretos com elevados teores de adições, trazem como proposta principal a redução do consumo de cimento através do uso de elevados teores de adições minerais para produzir concretos estruturais e duráveis [1-3]. A maioria dos trabalhos com essa temática utiliza concretos com consumo de cimento da ordem de 80 a 200 kg por m³ de concreto [3-6], como os analisados pioneiramente por Ravina e Mehta [7, 8] que utilizaram consumos da ordem de 135 kg de cimento por m³ de concreto, embora com resistências muito abaixo das atualmente requeridas para as construções modernas de múltiplos pavimentos.

A sustentabilidade de um concreto está relacionada com o consumo de clínquer necessário para produzir uma unidade de medida de uma determinada propriedade como sugere Damineli *et al* [9], que propõe o cálculo de uma relação de eficiência de desenvolvimento de resistência do concreto aos 28 dias (R_e), calculada como sendo a relação entre o consumo de ligantes por m³ de concreto e a resistência em MPa aos 28 dias, sendo R_e dado em kg m⁻³ MPa⁻¹. Su e Miao [2] consideram uma relação onde cada kg de cimento produz uma resistência à compressão entre 0.11 a 0.14 MPa, no desenvolvimento de um novo método de dosagem de concreto com baixo teor de cimento, essa relação gera R_e entre 7.1 e 9.1 kg m⁻³ MPa⁻¹.

O fator de eficiência para resistência à compressão aos 28 dias (R_e) é dependente da resistência à compressão aos 28 dias, gerando menores valores para resistências acima de 60 MPa e valores mais elevados, aproximadamente 20 kg m⁻³ MPa⁻¹, quando se utiliza resíduos como matéria-prima para agregados [9]. No entanto, esse fator de eficiência (R_e) não deve ser tomado como absoluto na análise da sustentabilidade de uma composição de concreto, uma vez que o empacotamento da mistura, a relação água-cimento e o tipo de cura influenciam fortemente, por exemplo os traços de concretos sustentáveis de ultra-alto desempenho analisados por Yu *et al* [10] que apresentam valores de R_e entre 7.5 a 9 kg m⁻³ MPa⁻¹, valores semelhantes ao proposto por Su e Miao [2].

Celik *et al* [11] verificaram que CAA com altos volumes de pozolana vulcânica e pó calcário produzem concretos sustentáveis com resistências à compressão da ordem de 20 a 40 MPa aos 28 dias e excelente durabilidade. Dinakar *et al* [12] estudaram CAA com consumo de cimento de 180 kg/m³ + 270 kg/m³ de escória e CAA com 180 kg de cimento por m³ de concreto + 202.5 kg/m³ de cinza volante + 67.5 kg/m³ de sílica de fumo. Esses CAA apresentaram resistência à compressão aos 90 dias de 65 e 45 MPa, respectivamente e permeabilidade a cloretos muito baixa. Enquanto o concreto de controle apresentou resistência de 73 MPa e permeabilidade a cloretos moderada.

Os concretos autoadensáveis com reduzidos teores de cimento vêm sendo cada vez mais estudados em virtude de aliarem a eficiência das adições minerais em agirem como modificadores de viscosidade e sustentabilidade dos baixos consumos de cimento agrupados ao CAA que eliminam a necessidade de energia para compactação dos concretos.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais, composições e moldagem

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 [13], 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. O quadro 1 apresenta a composição química dos materiais constituintes dos concretos.

Quadro 1. Composição química do cimento (C), da cinza volante CV e do metacaulino (Mk).

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PF
C (%)	19.92	4.36	3.51	62.92	1.83	2.86	-	-	3.12
CV (%)	48.61	23.79	7.91	3.06	2.07	0.40	0.78	3.78	2.64
Mk (%)	47.00	37.10	1.30	0.10	0.15	-	0.20	2.00	12.75

Foram produzidos cinco misturas de concretos autoadensáveis com teor de finos de 500 kg/m³, sendo uma mistura com apenas o cimento como fino (composição de referência 1: L500) e quatro com consumo de cimento de 196 e 147 kg/m³ e com adição de cinza volante, metacaulim e cal hidratada, como mostra o quadro 2, proporcionando uma redução do cimento equivalente a 60% e 70%. A definição destes traços partiu de concretos com elevados volumes de cinza volante anteriormente estudados por Camões [4].

Foi confeccionado ainda um concreto com 300 kg de cimento/m³ para ser utilizado como referência 2 (L300) com os CAA com baixo consumo de cimento (196 e 147 kg/m³), pois esses concretos apresentaram mesmo nível de resistência aos 28 dias.

Quadro 2. Composições dos concretos.

	CAA com reduzidos teores de cimento (CAA-RTC)					
	L500	L300	CV	CVCh	CVMK	CVMKCh
Cimento (kg/m ³)	500	300	196	196	147	147
Metacaulim (kg/m ³)	-	-	-	-	98	98
Cinza Volante (kg/m ³)	-	-	294	294	244	244
Cal hidratada (kg/m ³)	-	-	-	24	-	24
Agregado Miúdo (kg/m ³)	870	1053	851	851	850	850
Agregado Graúdo (kg/m ³)	880	867	861	861	860	850
água (kg/m ³)	200	180	171	171	171	171
Glenium Sky 27 (kg/m ³)	13.0	7.8	8.8	9.0	9.4	12.0
Ligante (CIM+CV+Mtk+CH)	500	300	490	514	489	513

Os concretos foram produzidos em misturadores de eixo vertical, sendo realizado logo após a mistura os ensaios no estado fresco e em seguida a moldagem de CP's cúbicos 100x 100x100 mm³.

2.2 Cura

Os concretos foram colocados em cura úmida por imersão a uma temperatura de 20±2°C até a idade pretendida para os testes. Foram retirados 3 provetes de cada composição após 3, 7, 14, 28, 90 e 360 dias de cura para determinação da resistência à compressão.

Para avaliar a temperatura de cura na hidratação e resistência dos concretos autoadensáveis com reduzidos teores de cimento (CAA-RTC) uma cura térmica foi realizada em 3 provetes de cada composição. A cura térmica consistiu em retirar os provetes após 21 dias de cura inicial por imersão e colocá-los em banho térmico a temperatura de 40°C por 3 dias acrescidos de mais 3 dias a 60°C e um dia de resfriamento dentro do banho térmico até a temperatura ambiente.

2.3 Ensaio no estado fresco

Os concretos foram avaliados através dos testes de slump flow (T500 e espalhamento), J-ring, V-funnel e L-box com 3 barras, Figura 3, seguindo as recomendações da EN 206-9 [14], através desses ensaios determina-se parâmetros de fluidez, viscosidade, habilidade passante e resistência à segregação.

2.4 Resistência à compressão

As composições foram ensaiadas após cura úmida por imersão aos 3, 7, 14, 21, 28, 90 e 360 dias de idade. Os CAA após cura térmica foram ensaiados aos 28 dias. 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%.

2.5 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 [15].

2.6 Análise microestrutural

A avaliação da hidratação foi realizada através de ensaios de difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os ensaios de difração de raios X foram realizados em um equipamento Bruker D8 Discover, com interpretação qualitativa do espectro efetuada por comparação com padrões contidos na base de dados ICDD/JCPDS. O ensaio de MEV foi realizado em um equipamento Nova NanoSEM 200.

3. RESULTADO E DISCUSSÕES

3.1 Propriedades no estado fresco

Os resultados das propriedades de fluidez, capacidade de enchimento, viscosidade e habilidade passante dos concretos autoadensáveis com reduzidos teores de cimento (CAA-RTC) são mostradas no quadro 3, que apresenta ainda a classificação desses concretos segundo as especificações EN 206-9.

Verifica-se a adequação de todos os CAA-RTC aos critérios de autoadensabilidade. O concreto L500 sem as adições minerais não demonstra habilidade passante e o L300 não se pretendia autoadensabilidade, mas sim elevado abatimento e espalhamento inicial de 500 mm, tornando este traço referência em termos de resistência à compressão em relação aos CAA-RTC.

Quadro 3. Propriedades dos concretos no estado fresco

Mix Id	Slump-flow		J-ring		V-test	L-box	Classificação segundo EN 206-9		
	T500 (s)	Slump-flow (mm)	T500 (s)	Slump-flow (mm)	Tempo (s)	H2/H1	Classe de fluidez	Classe de viscosidade	Habilidade passante
L500	1.67	625	obstruiu		4.6	0.75	SF1	VS1/VF1	*
L300	4.2	500	obstruiu		*	*	*	*	*
CV	1.85	700	2.23	700	4.8	0.86	SF2	VS1/VF1	PA2
CVCh	2.11	700	2.77	700	12,0	1,00	SF2	VS2/VF2	PA2
CVMK	3.15	670	3.43	615	13.9	0.92	SF2	VS2/VF2	PA2
CVMKCh	2.63	700	3.89	695	12.8	0.89	SF2	VS2/VF2	PA2

* Não Realizado

3.2 Resistência à compressão

As resistências à compressão dos CAA-RTC com idades de cura de 3, 7, 14, 21, 28 e 90 dias de cura úmida a 20±2°C são mostradas na Figura 1, caracterizando a evolução das resistências com tempo. Verifica-se que os traços CV, CVMK, CVCh e CVMKCh apresentaram resistências à compressão aos

28 dias de 27.8, 32.6, 40.9 e 40.0 MPa, respectivamente, o que confirma a aplicabilidade destes concretos em construções cujas resistências exigidas para os concretos sejam as classes C20/25 a C30/37, mesmo com consumo de cimento da ordem de 200 a 150 kg/m³.

A resistências obtidas pelos traços de CAA-RTC revelam a sustentabilidade em relação ao desenvolvimento de resistência do concreto aos 28 dias em relação ao consumo de cimento, pois verifica-se que os traços CV, CVMK, CVCh e CVMKCh produziram 0.14 MPa/kg, 0.22 MPa/kg, 0.20 MPa/kg e 0.27 MPa/kg de cimento utilizado em cada traço, respectivamente. Essas relações são muito maiores que as verificadas em concretos com baixo consumo de cimento e resistência moderadas, onde a relação foi entre 0.15 e 0.18 MPa/kg [2], ou em concreto convencionais como o traço L300 que apresentou 32.1 MPa com um consumo de 300 kg/m³, relação de 0.11 MPa/kg.

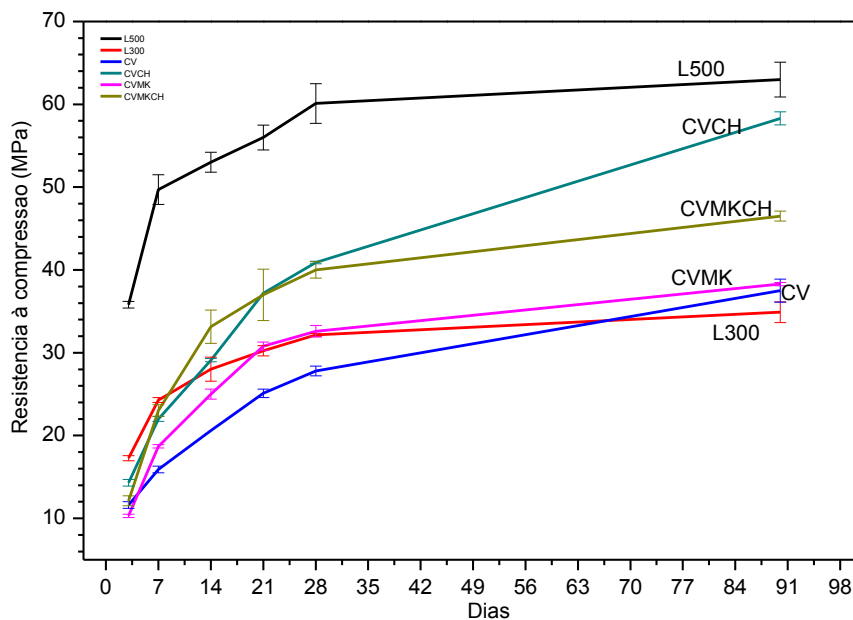


Figura 1. Evolução das resistências à compressão com a idade.

3.3 Absorção por capilaridade

A absorção de água por capilaridade é dependente da porosidade da matriz e interconectividade dos poros [16] e a absorção de água nas primeiras horas de ensaio está relacionada com o preenchimento dos capilares de maior diâmetro [4]. As curvas representativas da cinética de absorção de água por capilaridade dos concretos e CAA-RTC são apresentados na Figura 2, onde se verifica que os CAA-RTC apresentam coeficientes de absorção muito inferiores aos concretos analisados nos traços L500 e L300. Essa constatação era esperada para os CAA-RTC com adições minerais devido a efeitos químicos da reação pozolânica das adições como demonstrado por Anjos et al [17] e pelos efeitos físicos de empacotamento e preenchimento de poros que estão evidenciados na microscopia eletrônica de varredura apresentada na Figura 3.

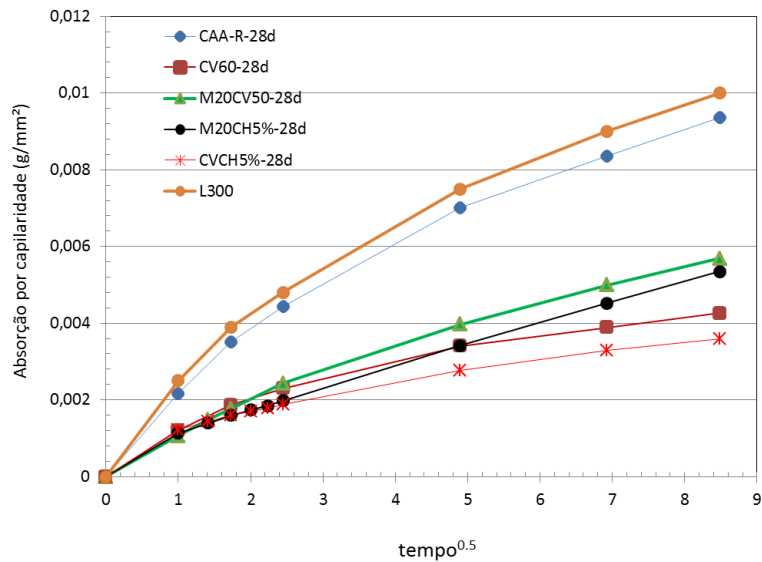


Figura 2. Curvas de absorção capilar dos concretos ensaiados após 28 dias de cura a 20±2°C.

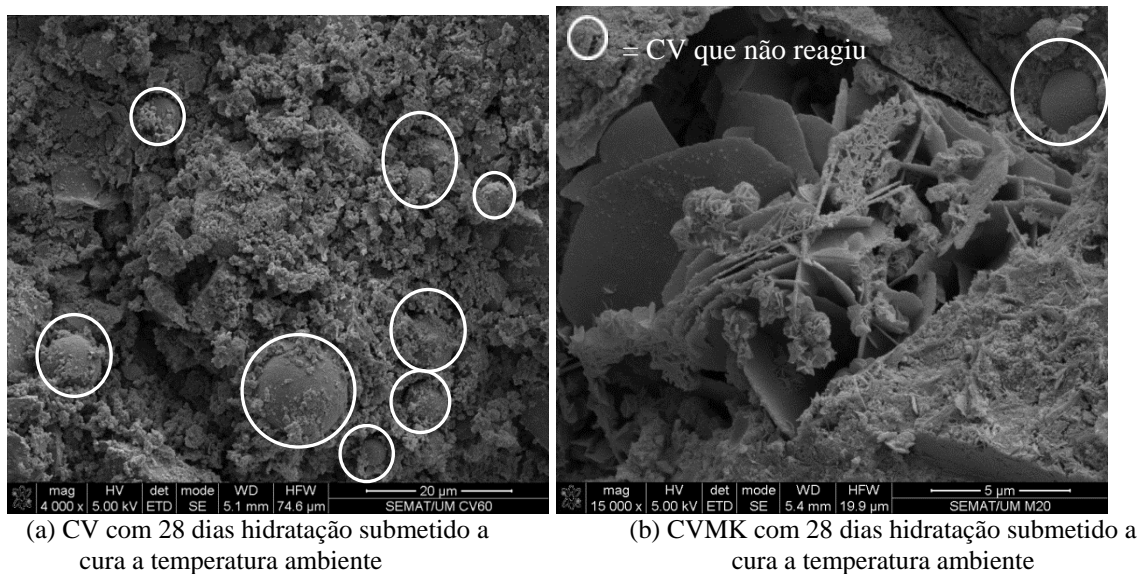


Figura 3. Micrograficas eletrônicas de varredura (MEV).

3.3 Cura térmica e análise microestrutural

Concretos com elevados teores de adições minerais apresentam lento ganho de resistência, apresentando melhores resultados aos 360 dias de hidratação [18]. No entanto, é conhecido que a utilização de cura térmica acelera as reações de hidratação fazendo com que estes concretos atinjam resistências elevadas a idades inferiores, como mostra a Figura 4.

A adição de cal hidratada nas composições CVCH e CVMKCh promove ganhos de resistência aos 28 dias sob cura normal, provavelmente devida a falta de hidróxido de cálcio para a reação com a cinza volante e metacaulim como pode ser visto na Figura 3 (a) e (b) que apresentam CV disponível para as reações, mas não há mais CH na mistura, pois aos 28 dias todo CH gerado foi consumido pela CV e MK como pôde ser confirmado na difratogrametria de raios X realizadas nessas amostras aos 28 dias e apresentadas na Figura 6.

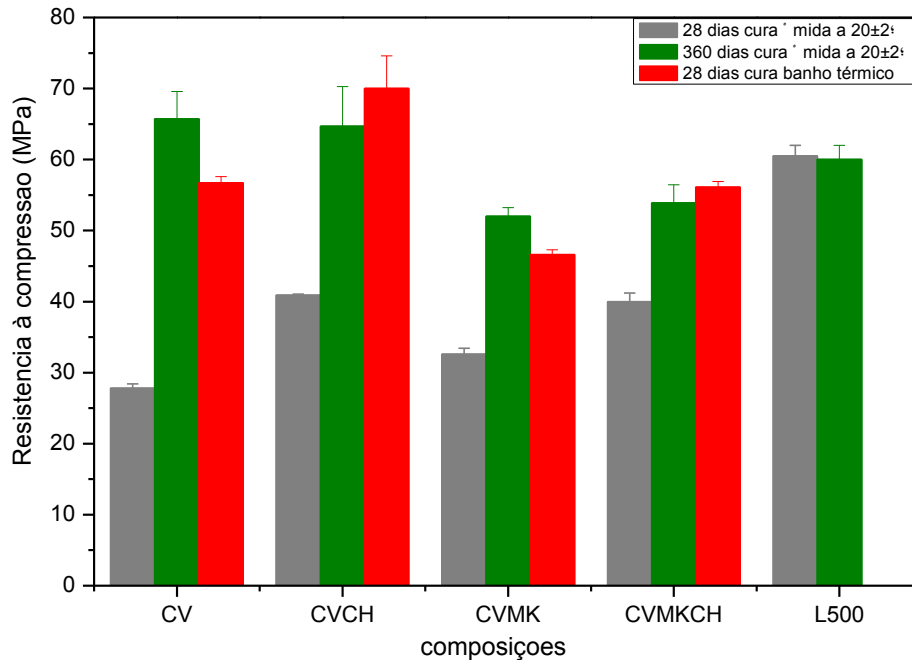
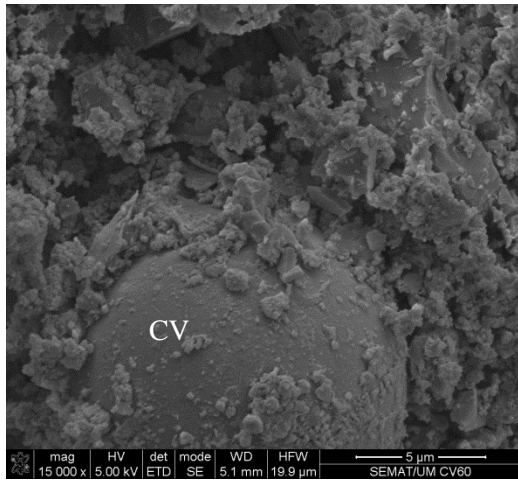


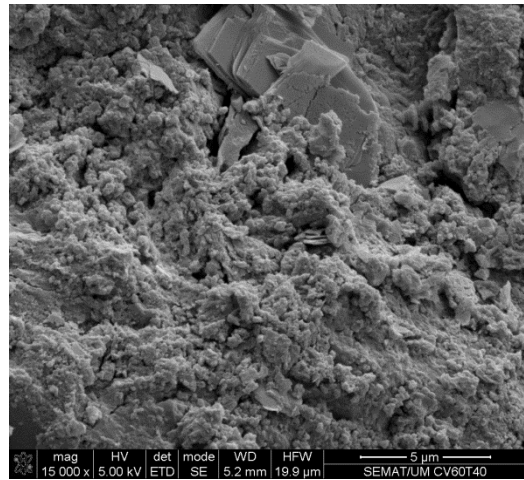
Figura 4. Resistência dos CAA-RTC após a cura ambiente por 28 e 360 dias e cura térmica (40/60°C).

Os concretos CVCh e CVMKCh submetidos a cura térmica apresentaram resistências superiores aos concretos curados por imersão em água durante um ano. Esta maior resistência dos concretos curados a 40/60°C se deve a maior disponibilidade de hidróxido de cálcio livre (CHL) para reagir com as adições minerais CV e MK em comparação aos concretos sem adição de cal hidratada, CV e CVMK que contém menores teores CHL, pois a partir de 7 dias as quantidades de CHL é muito baixa nas misturas com elevados teores de adições minerais sob cura úmida [17].

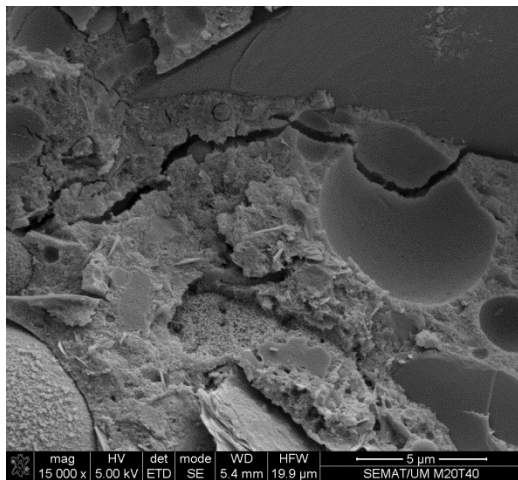
A cura térmica promove a maturidade do concreto devido ao aumento da cinética de reação [19] e o aumento da densidade dos produtos de hidratação como pode ser visto nas micrografias eletrônicas de varredura apresentadas na Figura 5, onde se verifica que as formulações CV e CVM após cura a 40/60°C apresenta uma maior densidade quando comparado ao concreto CV curado a 20°C. Adicionalmente, verifica-se partículas de cinza volante que não reagiu quando a mistura CV foi curada a 20°C, comprovando a menor cinética da reação, desse concreto quando comparado ao concreto CV curado a 40/60°C onde se verifica uma estrutura mais densa. A densificação da matriz cimentícia é observada quando as misturas têm sílica adicional disponível mesmo em temperaturas muito elevadas como as analisadas [5, 20].



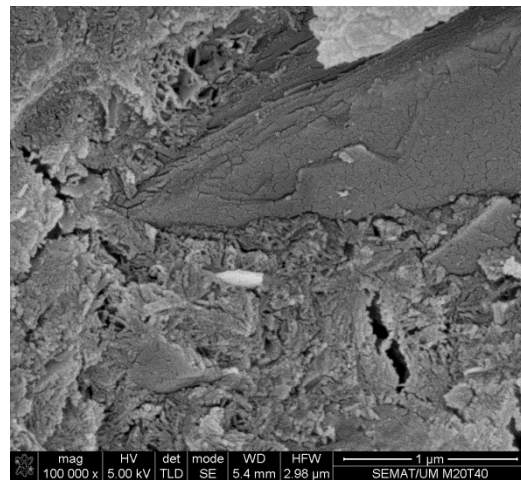
(a) CV com 28 dias hidratação submetido a cura a temperatura ambiente



(b) CV com 28 dias hidratação submetido a cura com temperatura 40/60°C



(a) CVMK com 28 dias hidratação submetido a cura a temperatura ambiente



(b) CVMK com 28 dias hidratação submetido a cura com temperatura 40/60°C

Figura 5. Micrograficas eletrônicas de varredura (MEV).

A Figura 6 mostra os difratogramas de raios X dos CAA-RTC após cura ambiente por 28 dias e cura térmica e permite verificar a inexistência de hidróxido de cálcio nas amostras de CV e CVMK após cura aos 28 dias, corroborando com as micrograficas eletrônicas de varredura apresentadas nas Figuras 3 e 5, e com análises feitas nas pastas desses concretos apresentadas por Anjos [17]. No entanto, há hidróxido de cálcio livre para a reação aos 28 dias nas pastas com adição de 5% de cal [17].

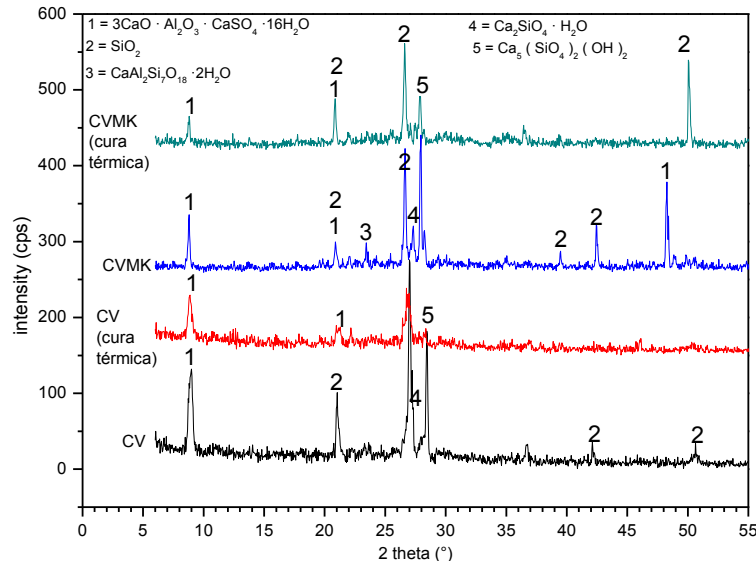


Figura 6. Difratogramas de raios X das composições de CAA-RTC após cura ambiente e cura térmica.

CONCLUSÕES

A cinza volante e o metacaulim são excelentes modificadores de viscosidade para concretos autoadensáveis com baixo consumo de cimento. Os CAA com consumos de cimento de 147 e 196 kg por m³ de concreto produzem resistência moderada, entre 25 e 40 MPa quando hidratados a temperatura ambiente aos 28 dias e resistências entre 37 e 58 MPa aos 90 dias e 52 a 65 MPa aos 360 dias. As resistências são sempre maiores nos CAA-RTC que utilizaram 5% de cal hidratada sobre a massa do ligante.

Os CAA com reduzidos teores de cimento promovem uma significativa redução nos coeficientes de absorção de água por capilaridade, devido ao efeito físico de preenchimento de poros verificados por MEV e químico de reacção pozolânica verificado por DRX.

A cura térmica utilizada promove a maturidade das resistências à compressão, propiciando resistências de 46 a 70 MPa aos 28 dias, superando as resistências atingidas aos 360 dias nos traços com cal hidratada. Os CAA com reduzidos teores de cimento apresentam-se mais compactos após cura térmica e com mais compostos hidratados do tipo silicato de cálcio.

AGRADECIMENTOS

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível pela concessão de bolsa de pós-doutorado ao primeiro autor, processo 6517-10-2.

REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] Su N, Miao B. A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content. *Cement and Concrete Composites*. 2003;25(2):215-22.
- [3] Isaia GC, Gastaldini ALG. Concrete sustainability with very high amount of fly ash and slag. *RIEM-Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2009;2(3).

- [4] Camões A. Durability of high volume fly ash concrete. International RILEM Workshop on performance based evaluation and indicators for concrete durability. Madrid2006. p. 311-8.
- [5] Rashad AM. An exploratory study on high-volume fly ash concrete incorporating silica fume subjected to thermal loads. *Journal of Cleaner Production*. 2015;87:735-44.
- [6] Malhotra V. Durability of concrete incorporating high-volume of low-calcium (ASTM class F) fly ash. *Cement and Concrete Composites*. 1990;12(4):271-7.
- [7] Ravina D, Mehta PK. Properties of fresh concrete containing large amounts of fly ash. *Cement and Concrete Research*. 1986;16(2):227-38.
- [8] Ravina D, Mehta P. Compressive strength of low cement/high fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*. 1988;18(4):571-83.
- [9] Damineli BL, Kemeid FM, Aguiar PS, John VM. Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement and Concrete Composites*. 2010;32(8):555-62.
- [10] Yu R, Spiesz P, Brouwers H. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. *Cement and Concrete Composites*. 2015;55:383-94.
- [11] Celik K, Jackson M, Mancio M, Meral C, Emwas A-H, Mehta P, 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;45:136-47.
- [12] Dinakar P, Babu K, Santhanam M. Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes. *Cement and Concrete Composites*. 2008;30(10):880-6.
- [13] EN N. 450-1-Cinzas volantes para betão. Parte1: definições, especificações e critérios de conformidade Instituto Português da Qualidade. 2006.
- [14] Norma Portuguesa NP EN 206-9. Betão. Parte 9: Regras adicionais para betão autocompactável (BAC). Lisboa: IPQ2010. p. 35.
- [15] LNEC E. E 393-1993. Determinação da absorção de água por capilaridade.
- [16] Pereira-de-Oliveira L, Nepomuceno M, Castro-Gomes J, Vila M. Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. 2014;51:113-20.
- [17] 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.
- [18] Celik K, Jackson M, Mancio M, Meral C, Emwas A, Mehta P, 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*. 2013.
- [19] Escalante-Garcia J. Nonevaporable water from neat OPC and replacement materials in composite cements hydrated at different temperatures. *Cement and concrete research*. 2003;33(11):1883-8.
- [20] Anjos MA, Martinelli AE, Melo DM. Effect of sugarcane biomass waste in cement slurries submitted to high temperature and pressure. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;529:49-54.