





Resistência à compressão e microestrutura de concreto fabricado com materiais à base de cimento supersulfatado de origem vulcânica expostos a um ambiente de sulfato

K. Cabrera Luna¹ , J. I. Escalante García² , D. Nieves Mendoza³ , E. E. Maldonado Bandala^{3*} 

Autor de Contato: erimaldonado@uv.mx
DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.374>

Recepção: 09/12/2018 | Aceitação: 29/12/2018 | Publicação: 30/12/2018

RESUMO

Esta pesquisa apresenta os resultados de concretos fabricados com cimentos supersulfatados (SSC) com bases de materiais vulcânicos. Os concretos foram curados sob duas condições, uma por 24 h a 25°C e outra por 22 h a 60°C e depois a 25°C. As amostras foram expostas a duas condições, a seco em condições de laboratório e imersos em solução com 3,5% de CaSO₄ a 25°C por até 180 dias. Após 180 dias, o concreto com um cimento composto de 5% An-10% PC-10% CaO-75% PM exposto à solução de CaSO₄ atingiu uma resistência à compressão de 46 MPa e 44 MPa em condições secas de laboratório. A microestrutura foi analisada por microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia de dispersão de energia e DRX, mostrando que os principais produtos de hidratação são C-S-H e etringita.

Palavras-chave: concreto supersulfatado; pedra-pomes; resistência à compressão; ambiente de sulfato.

Citar como: K. Cabrera Luna, J. I. Escalante García, D. Nieves Mendoza, E. E. Maldonado Bandala (2019), “Resistencia a la compresión y microestructura de concretos fabricados con cementos supersulfatados base materiales de origen volcánico expuestos a un ambiente de sulfato”, Revista ALCONPAT, 9 (1), pp. 106 – 116, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.374>

¹ Universidad Autónoma de Baja California, México.

² Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Saltillo, México

³ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Veracruzana, Veracruz, México.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2019.

Compressive strength and microstructure of concretes manufactured with supersulfated cement based on materials of volcanic origin exposed to a sulfate environment

ABSTRACT

This paper presents the results of concretes manufactured with supersulfated cement (SSC) based on volcanic materials. The concretes were cured under two regimes, one for 24 h at 25 °C and another for 22 h at 60 °C and then at 25 °C. The specimens were exposed to two conditions: dry laboratory conditions and immersed in a solution with 3.5% CaSO₄ at 25 °C for up to 180 days. After 180 days, the concrete with a cementitious compound of 5% An-10% PC-10% CaO-75% PM reached a compressive strength of 46 MPa exposed to CaSO₄ solution and of 44 MPa in dry laboratory conditions. The microstructure was analyzed by scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy and X-ray diffraction, which showed that the main hydration products are C-S-H and ettringite.

Keywords: supersulfated concrete; pumice; compressive strength; sulfate environment.

Resistencia a la compresión y microestructura de concretos fabricados con cementos supersulfatados base materiales de origen volcánico expuestos a un ambiente de sulfato

RESUMEN

Esta investigación presenta los resultados de concretos fabricados con cementos supersulfatados (SSC) bases materiales volcánicos. Los concretos fueron curados bajo dos regímenes uno por 24 h a 25°C y otro por 22 h a 60°C y luego a 25 °C. Los especímenes fueron expuestos a dos condiciones, en seco en condiciones de laboratorio e inmersos en una solución con 3.5% CaSO₄ a 25°C hasta por 180 días. Después de 180 días, el concreto con un cementante compuesto de 5% An-10% PC-10% CaO-75% PM expuesto a la solución de CaSO₄ alcanzó una resistencia a la compresión de 46 MPa y 44 MPa en seco en condiciones de laboratorio. La microestructura fue analizada por microscopia electrónica de barrido, espectroscopia por dispersión de energía y DRX, mostró que los principales productos de hidratación son C-S-H y etringita.

Palabras clave: concreto supersulfatado; pómez; resistencia a la compresión; ambiente de sulfato.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material composto mais utilizado no mundo, envolvendo o cimento Portland (PC) como o material da indústria da construção com o maior consumo com uma produção anual de cerca de dois bilhões de toneladas, emitindo o equivalente em toneladas de CO₂ (Shi et al., 2011). O esforço para reduzir a poluição do ar levou à pesquisa e utilização de novos materiais cimentícios mais amigáveis com o meio ambiente, tais como os cimentos supersulfatados (SSC). Devido a sua economia de energia, de baixo carbono e reutilização resíduos (Ding et al., 2014), estes podem reduzir as emissões de CO₂ em 90% em comparação com cimento Portland (Woltron et al., 2015). Os SSC são geralmente compostos de escória de alto-forno granulada, uma fonte de sulfato com hemihidrato (HH) e anidrita (An) e uma pequena quantidade de ativador alcalino, principalmente clínquer de cimento Portland (Kuhl, 1908; Midgley e Pettifer, 1971; Bijen e Niel, 1981; VP Mehrotra et al., 1982; Dutta e Borthakur, 1990; Grounds et al., 1995; Taylor, 1998; Juenger et al., 2011) ou de hidróxido de cálcio e hidróxido de potássio (Kamlet, 1960.). Poucas investigações estudaram cimentos supersulfatados compostos por pozolanas naturais (Cabrera-Luna et al., 2018).

O objetivo desta pesquisa é apresentar o estudo das propriedades mecânicas e da microestrutura do concreto fabricado com SCC composto de um material de pedra-pomes de origem vulcânica. Os concretos foram expostos a seco em condições de laboratório e imersos em uma solução de 3,5% de CaSO₄, iniciando aos 28 dias de idade. Este trabalho é parte de uma pesquisa sobre SSC com material de origem vulcânica (Cabrera-Luna et al., 2018).

2. MATERIAIS

Cimento supersulfatado base pedra-pomes composta por um material de origem vulcânica (PM), com uma área superficial de 600 m²/kg, duas fontes de sulfato: hemihidrato (HH) comercialmente disponível e anidrita (An) subproduto industrial, duas fontes alcalinas: CPC 30R (PC) (ONNCCE, 2014) e óxido de cálcio (CaO) comercialmente disponíveis. A Tabela 1 mostra a composição química dos principais óxidos dos materiais de partida.

O agregado fino era de origem vulcânica com um módulo de finura de 2,84. O agregado graúdo com dimensão nominal máxima de 12,5 mm e densidade volumétrica de 1.388,54 kg/m³. Um superplastificante do tipo policarboxilato foi usado para manter a relação água/ cimento de 0,30 e abatimento de 75 a 100 mm.

Tabela 1. Composição química dos materiais de partida por fluorescência de raios-X (% wt)

Óxidos %wt	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Outros
PM	68.73	14.01	5.45	3.69	2.50	1.64	0.34		3.64
An					0.11	43.83		55.45	0.61
HH	0.94					39.70	0.58	51.69	7.09
PC	17.74	3.97	1.09		3.65	62.71	1.36	4.45	5.03
CaO						87.68	0.35	0.83	11.14

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Estudos de traço e moldagem das amostras

Quatro traços de concreto foram estudados com base no procedimento proposto pelo Método do Volume Absoluto, publicado pelo ACI 211.1 (ACI Committee 211, 2002), com uma relação água/cimento de 0,30, com 720 kg/m³ de cimento e um abatimento de 75 a 100 mm. Foram utilizados quatro materiais cimentícios diferentes, compostos de: 1) 5% HH-20% PC-75% PM, 2) 15% HH-10% PC-10% CaO-65% PM, 3) 5% An-10% PC -10% CaO-75% PM e 4) 15% An-20% PC-65% PM. A Tabela 2 mostra a quantidade dos componentes do cimento. Um concreto de referência foi feito com 100% de PC (C-R).

Para o ensaio de resistência à compressão, foram fabricados cubos de 100 mm de aresta, de acordo com a norma UNE-EN 12390-1 (AENOR, 2001). As amostras de concreto tiveram um tratamento inicial de cura: uma cura a 25 ° C (T25) por 24 h e outro uma cura térmica inicial a 60°C por 22 h e depois a 25°C (T60).

Após 28 dias as amostras foram expostas a dois ambientes, um seco em condições de laboratório a 25°C (L) e outro consistindo de ciclos de 7 dias imersos em uma solução de 3,5% CaSO₄ a 25°C e 7 dias no laboratório a 25°C (S).

Tabela 2. Composição dos cimentos para os concretos (kg/m³)

Nomenclatura	Pedra-pomes (PM)	Hemihidrato (HH)	Anidrita (An)	Óxido de cálcio (CaO)	Cimento Portland (PC)
	kg/m ³				
C-1	540	36	-	-	144
C-2	468	108	-	72	72
C-3	540	-	36	72	72
C-4	468	-	108	-	144
C-R	-	-	-	-	415

3.2 Caracterização

A resistência à compressão do concreto foi determinada até 180 dias pela aplicação de uma carga com velocidade de 0,4 MPa/s conforme a norma UNE-EN 12390-3 (AENOR, 2003). Os fragmentos dos cubos ensaiados foram secos por 72 h em metanol e, em seguida, em câmara de vácuo a 38°C por um período de 72 h. Em seguida, fragmentos de cubos secos foram montados sobre resina, debastados, polidos e cobertos com uma camada de carbono, estes foram analisados através de um microscópio eletrônico de varredura (MEB, Phillips modelo XL-30ESEM) operado a 20 kV.

4. RESULTADOS

4.1 Resistência à compressão

Os valores relatados representam a média de três cubos. Os resultados da evolução da resistência à compressão do concreto para o regime de cura de T25 expostos em condições secas em laboratório a 25°C (L) e imersos em uma solução de 3,5% CaSO₄ a 25°C (S) até os 180 dias de idade são mostrados na Fig. 1. Aos 28 dias observou-se que o concreto C-2 apresentou a menor resistência com 22 MPa, porém, após 180 dias, a resistência aumentou chegando a cerca de 41 MPa ambas as condições de exposição, sendo superiores ao valor do concreto de referência. Por outro lado, o concreto C-3 alcançou a maior resistência em torno de 44 MPa quando exposto à solução de 3,5% de CaSO₄, sendo 24% superior ao concreto de referência (CR) com a idade de 180 dias. Os valores do desvio padrão das médias foram de $\pm 0,10$ -2,30 MPa.

A Fig. 2 mostra os resultados da resistência à compressão dos corpos de prova para o regime de cura de T60 expostos a condições de laboratório a 25°C e imersos em uma solução de 3,5% de CaSO₄ a 25°C. A resistência à compressão do concreto C-1 e C-3 aos 28 dias alcançou valores em torno de 32 MPa, semelhante ao CR, entretanto, após 180 dias C-1 e C-3 expostos a condições laboratoriais apresentaram em torno de 42 e 44 MPa, respectivamente, sendo superior ao concreto de referência com 36 MPa, enquanto o C-3 imerso em uma solução de 3,5% de CaSO₄ atingiu 46 MPa. A cura inicial favoreceu a resistência inicial e tardia de acordo com resultados anteriores (Cabrera-Luna et al., 2018). Os valores do desvio padrão das médias foram de $\pm 0,17$ -1,76 MPa.

Em geral, observou-se que a composição química e a cura inicial influenciaram o desenvolvimento da resistência de acordo com resultados anteriores (Cabrera-Luna et al., 2018). Esses fatores tiveram um efeito favorável na densificação da matriz, proporcionando resistência ao sulfato de cálcio (Grounds et al, 2003). Por outro lado, o desenvolvimento de resistência de SSC é mais lento em comparação com o cimento Portland (Noor-ul-Amin, 2014), porque o processo de hidratação do SSC é lento em idades precoces, portanto, a resistência à compressão do concreto aumenta acentuadamente em idades avançadas (Ding et al., 2014). O ganho de resistência à compressão

além de 28 dias pode estar relacionado à velocidade dos produtos de hidratação e à morfologia do gesso formado (Cabrera-Luna et al., 2018).

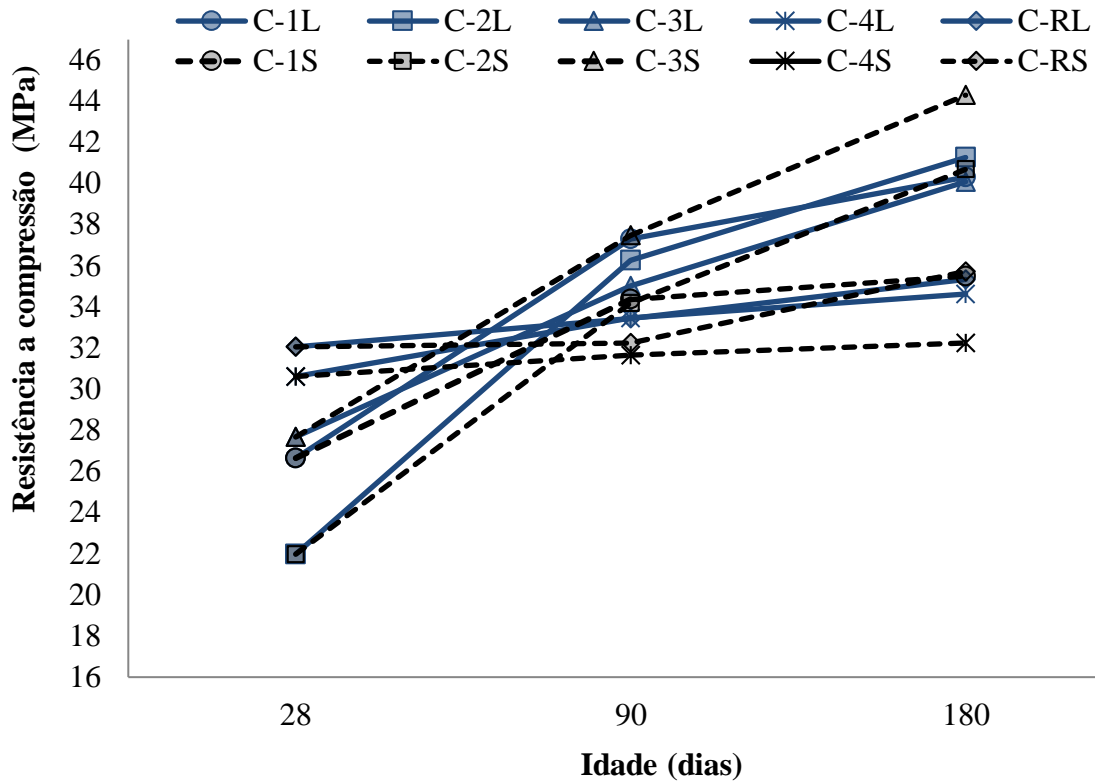


Figura 1. Resistência à compressão de amostras para o regime T25 expostos a seco em condições de laboratório (L) e imersos em uma solução de 3.5% CaSO₄ a 25°C (S).

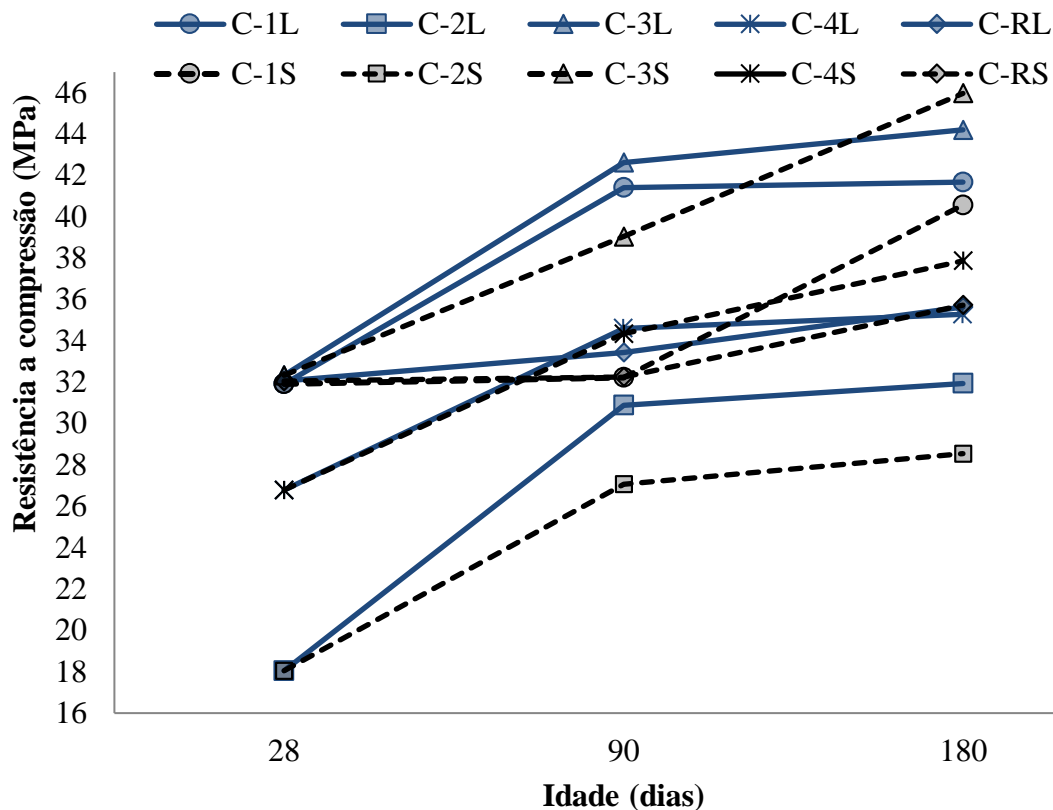


Figura 2. Resistência à compressão de amostras para o regime T60 expostos a seco em condições de laboratório (L) e imersos em uma solução de 3.5% CaSO_4 a 25°C (S).

4.2 Difração de raios-X (DRX)

A Fig. 3 apresenta os padrões de XRD do PM e do cimento composto de 15% An-20% PC-65% PM aos 28 dias, que foi usado para fazer o concreto C-4. Após a ativação química do PM aos 28 dias, observou-se que o halo amorfo do PM diminuiu de intensidade e foi ligeiramente deslocado para a direita, sugerindo que as partículas de PM reagiram com os ativadores para formar os produtos de hidratação, como a etringita, anidrita, gesso e CSH, identificados como as principais fases hidratadas. Os picos de reflexão da anidrita mostram baixa solubilidade e reatividade, o que influenciou na baixa formação de etringita, o que está de acordo com a presença de picos de reflexão de etringita, sugerindo que o desenvolvimento de resistência em idades posteriores é principalmente devido à formação de CSH de acordo com (Cabrera-Luna et al., 2018).

1 Albita 2 Anortita 3 Etringita 4 Anidrita 5 Gesso 6 CSH

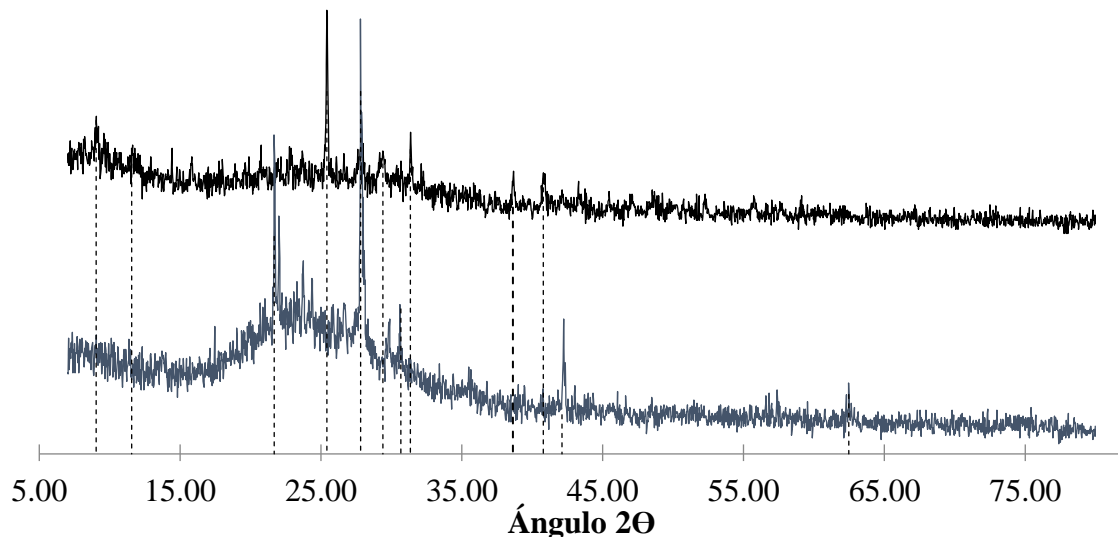


Figura 3. Padrões de DRX del cimento composto 5% An-20%PC -75% PM (C-4)

4.3 Microscopia eletrônica de Varredura (MEV)

A Fig. 4 e a Figura 5 mostram a microestrutura do concreto C-3 (5% An-10% PC-10% CaO-75% PM) para o regime T60 exposto a seco em condições de laboratório a 25°C (L) a 28 dias e imersos em uma solução de CaSO₄ a 3,5% a 25°C (S) aos 90 dias, respectivamente. As imagens foram obtidas usando elétrons retroespalhados. Em todas as micrografias foram observadas partículas de pedra-pomes identificadas por uma morfologia irregular de tamanhos diferentes, sugerindo que nem todas as partículas reagiram para formar produtos de hidratação, além disso, devido ao seu tamanho, é fácil distinguir partículas agregadas que estão embutidas na matriz de produtos de reação.

Partículas de anidrita não foram observadas, sugerindo que os íons Ca⁺ e SO₄²⁻ reagiram com a fase de alumina do PM para formar etringita (Juenger et al., 2011; Sadique et al., 2012; Bazaldúa-Medellín et al., 2015; Gracioli et al., 2017; Rubert et al., 2018). Na Figura 4, a ausência de grãos de PC sugere que eles reagiram com água para formar mais Ca(OH)₂, promovendo a dissolução de PM para produzir C-S-H e outros produtos (Sadique et al., 2012). A microestrutura era densa com trincas causadas pela secagem do gel sob as condições do alto vácuo da coluna do microscópio (Avila-López et al., 2015).

Em geral, a interface matriz-agregado é contínua, não foram observadas fissuras nesta área mostrando boa aderência. Por outro lado, nas amostras polidas a etringita é difícil de detectar, além disso, é facilmente decomposta sob as condições de secagem em alto vácuo da coluna do microscópio (Bazaldúa-Medellín et al., 2015). Entretanto, os espectros de microanálise por raios X (EDS) permitiram sua identificação, mostrando que os principais produtos de hidratação dos concretos de SSC são CSH e etringita distribuídos através da matriz finamente misturada, o que está de acordo com (Cabrera -Luna et al., 2018).

A presença de cristais de etringita proporciona resistência ao invés de expansão (Sadique et al., 2012), estes foram depositados nos espaços dos poros (Wolfe et al., 2001), inicialmente ocupados por água (Cabrera-Luna et al., 2018), densificando a microestrutura da matriz em conjunto com o C-S-H (Bazaldúa-Medellín et al., 2015), melhorando a resistência, assim, essa fase não foi acompanhada de expansão (Wolfe et al., 2001), não houve expansão visível em amostras de concreto após 180 dias. Esses resultados coincidem com os padrões de DRX.

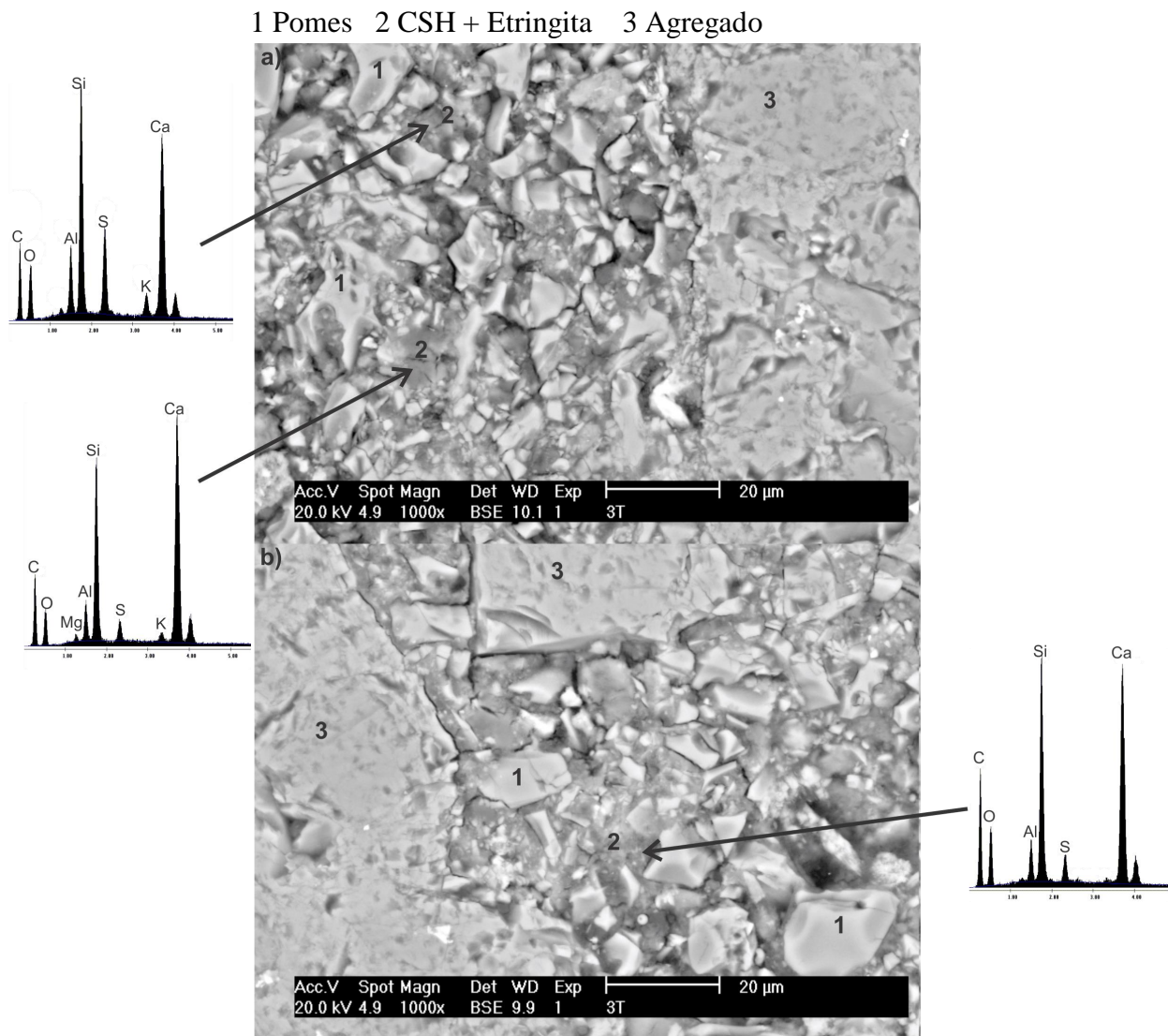


Figura 4. Imagens obtidas por MEV usando elétrons retrodispersados do concreto C-3 (5% An-10%PC-10%CaO-75%PM) para o regime T60 exposto a seco em condiciones de 25°C por 28 dias.

1 Pomes 2 CSH + Etringita 3 PC parcialmente hidratado 4 Agregado

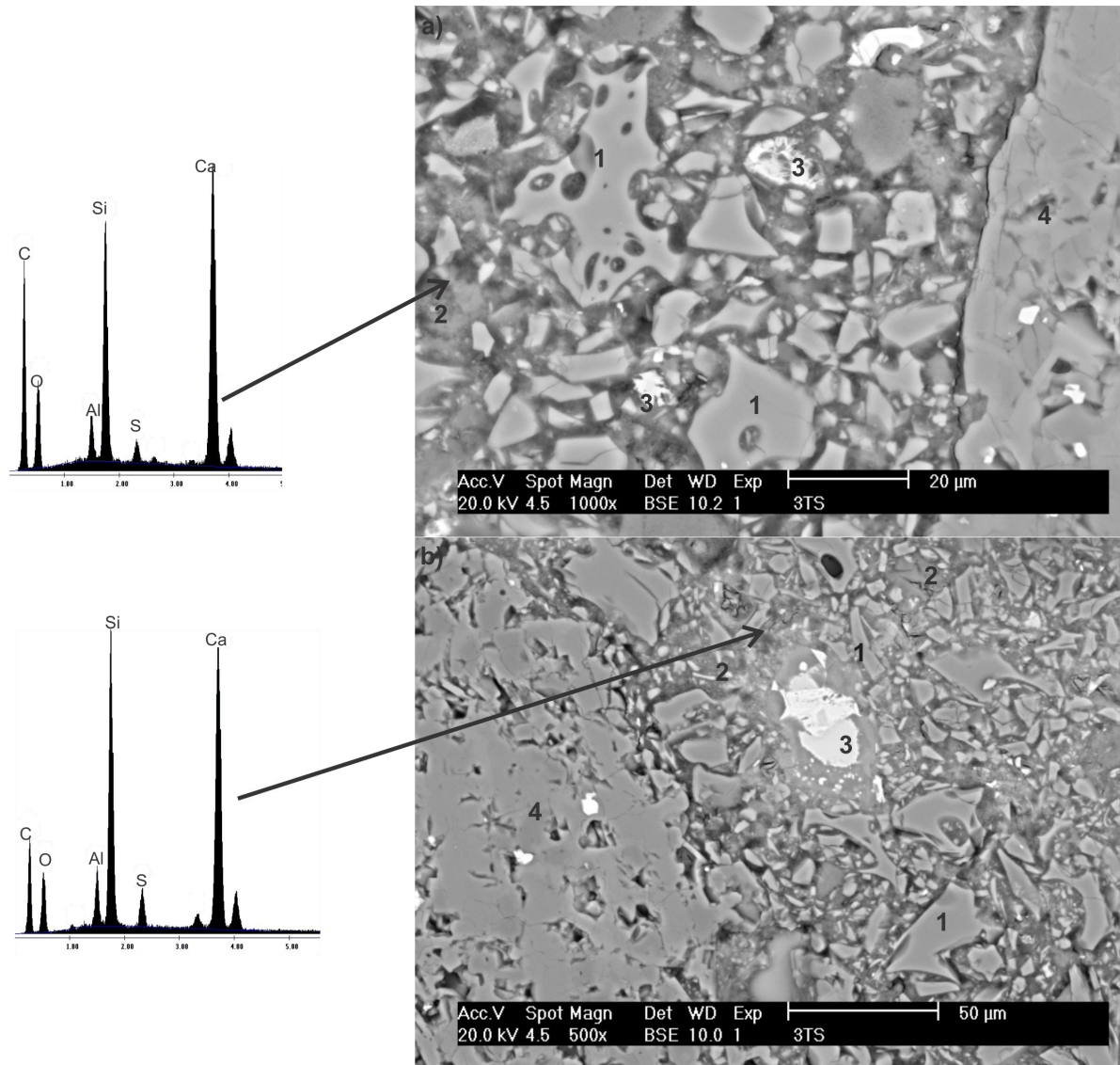


Figura 5. Imagens obtidas por MEV usando elétrons retrodispersados do concreto C-3 (5% An-10%PC-10%CaO-75%PM) para o regime T60 imersos em uma solução de 3.5% CaSO_4 a 25°C por 90 dias.

5. DISCUSSÃO

A degradação do concreto causada por mecanismos de ataque de sulfato depende de fatores como o tipo de cimento, presença de adições minerais, relação água/cimento, tipo de cátion associado ao ânion sulfato, concentração de sulfato, tempo e duração da exposição, ambiente, grau das condições de hidratação e cura (Hossain e Lachemi, 2006; Prasad et al., 2006; Indu Siva Ranjani e Ramamurthy, 2012), além de outros parâmetros como estrutura de poros, permeabilidade, difusividade e propriedades mecânicas (Prasad et al., 2006).

Em concretos fabricados com cimento Portland, o ataque de sulfato depende da disponibilidade de Ca(OH)_2 e C_3A (Hossain e Lachemi, 2006), portanto a composição química do cimento tem papel importante na resistência ao sulfato (Prasad et al., 2006). Os SSCs desta investigação foram de base pedra-pomes vulcânica, sulfato de cálcio e fontes alcalinas; quando expostos à solução de sulfato de cálcio por meio de ciclos úmido e seco, estes apresentaram estabilidade e desenvolvimento de

Resistência à compressão e microestrutura de concreto fabricado com materiais à base de cimento supersulfatado de origem vulcânica expostos a um ambiente de sulfato

resistência, com microestruturas estáveis. Isto sugere que os íons sulfato externos não encontraram condições para descalcificar o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou C-S-H.

Além disso, a diminuição no consumo de PC reduz a quantidade de aluminatos de cálcio, que já haviam encontrado uma fonte abundante de sulfato de cálcio dos aditivos do SSC, formando assim a etringita que se estabilizou como tal; além disso, o baixo teor de Al do PM e a abundância de sulfato de cálcio também minimizaram a possibilidade de etringita tardia deletéria. No entanto, a expansão não depende apenas da quantidade e do tempo de formação da etringita, a localização da formação também é importante (Wojceich, Marczewska e Jaworska, 1985); Neste caso, a natureza da microestrutura, a taxa de reação dos componentes do SSC, favoreceu uma sequência de reações e a deposição de produtos de reação que mostraram um balanço favorável que resultou em microestruturas resistentes formando cimentos duráveis. Por outro lado, a baixa relação água/cimento utilizada deve ter tido um efeito positivo, reduzindo o volume e a conectividade da rede porosa, o que reduziu a penetração de agentes externos (Indu Siva Ranjani e Ramamurthy, 2012). Em geral, nenhuma degradação física foi observada durante o período do estudo, como fissuras, descolamento, perda de resistência e adesão. Os concretos de SSC parecem adequados para uso em condições marinhas e para a construção de tubulações de esgoto.

6. CONCLUSÕES

A resistência à compressão das amostras curadas a 25°C mostrou que os concretos feitos com compostos cimentícios de 15% HH-10% PC-10% CaO-65% PM e 5% An-10% PC-10% CaO-75% PM, atingiu em torno de 41 e 44 MPa, respectivamente, quando imersos em uma solução de 3,5% de CaSO_4 .

Os concretos supersulfatados com cimentos compostos de 5% HH-20% PC -75% PM, 5% An-10% PC-10% CaO-75% PM e 15% An-20% PC -65% PM curados a 60°C apresentaram resistências maiores que o concreto de referência em até 30%, imersas em uma solução de 3,5% de CaSO_4 .

Os principais produtos de hidratação do concreto supersulfatado detectados por DRX, SEM e EDS foram C-S-H e etringita, que proporcionaram uma resistência à compressão favorável quando expostos a condições de laboratório e sulfato de cálcio.

A cura a 60°C por 22 h favorece a resistência em idades precoces e o desenvolvimento em idades posteriores, principalmente a partir de amostras expostas a sulfato em quase todos os concretos.

A microestrutura do concreto com composto cimentício de 5% An-10% PC-10% CaO-75% PM mostrou partículas de PM não reagidas e agregados embutidos em uma estrutura de pasta com matriz relativamente densa.

Em geral, o concreto supersulfatado apresenta valores favoráveis de resistência à compressão quando exposto a uma solução de CaSO_4 a 3,5%, mostrando propriedades adequadas para uso em ambientes marinhos.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología pela bolsa de estudo a K Luna-Cabrera, e pelo apoio financeiro ao projeto Conacyt FC-2015-2 / 906.

8. REFERÊNCIAS

- ACI Committee 211 (2002), *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*.
- AENOR (2001), *UNE-EN 12390-1, Testing hardened concrete. Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds*.

- AENOR (2003), *UNE-EN 12390-3, Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens*.
- Avila-López, U., Almanza-Robles, J. M., Escalante-García, J. I. (2015), "Investigation of novel waste glass and limestone binders using statistical methods", *Construction and Building Materials*, 82, pp. 296–303. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.085.
- Bazaldúa-Medellín, M. E. *et al.* (2015), "Early and late hydration of supersulphated cements of blast furnace slag with fluorgypsum", *Materiale de Construcție*, 65(317), p. e043. doi: 10.3989/mc.2015.06013.
- Bijen, J., Niël, E. (1981), "Supersulphated cement from blastfurnace slag and chemical gypsum available in the Netherlands and neighbouring countries", *Cement and Concrete Research*, 11(3), pp. 307–322. doi: 10.1016/0008-8846(81)90104-6.
- Cabrera-Luna, K. *et al.* (2018), "Supersulfated binders based on volcanic raw material: Optimization, microstructure and reaction products", *Construction and Building Materials*, 176, pp. 145–155. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.024.
- Ding, S. *et al.* (2014), "Properties of supersulphated phosphogypsumslag cement (SSC) concrete", *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 29(1), pp. 109–113. doi: 10.1007/s11595-014-0876-9.
- Dutta, D. K., Borthakur, P. C. (1990), "Activation of low lime high alumina granulated blast furnace slag by anhydrite", *Cement and Concrete Research*, 20(5), pp. 711–722.
- Gracioli, B. *et al.* (2017), "Considerações sobre a resistência mecânica e o processo de hidratação de cimentos supersulfatados (CSS) formulados com fosfogesso", *Matéria (Rio de Janeiro)*, 22(1). doi: 10.1590/s1517-707620170001.0107.
- Grounds, T., Nowell, D. V., Wilburn, F. W. (2003), "Resistance of supersulfated cement to strong sulfate solutions", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 72(1), pp. 181–190. doi: 10.1023/A:1023928021602.
- Grounds, T., Nowell, D. V., Wilburn, F. W. (1995), "The influence of temperature and different storage conditions on the stability of supersulphated cement", *Thermal Analysis*, 45, pp. 385–394. doi: 10.1007/BF02549342.
- Hossain, K. M. A., Lachemi, M. (2006), "Performance of volcanic ash and pumice based blended cement concrete in mixed sulfate environment", *Cement and Concrete Research*, 36(6), pp. 1123–1133. doi: 10.1016/j.cemconres.2006.03.010.
- Indu Siva Ranjani, G., Ramamurthy, K. (2012), "Behaviour of foam concrete under sulphate environments", *Cement and Concrete Composites*. Elsevier Ltd, 34(7), pp. 825–834. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.03.007.
- Juenger, M. C. G. *et al.* (2011), "Advances in alternative cementitious binders", *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 41, pp. 1232–1243. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.11.012.
- Kamlet, J. (1960), "US2947643A Hydraulic Cements".
- Kühl, H. (1908), "German Patent No. 237777". German.
- Midgley, H. G., Pettifer, K. (1971), "The microstructure of hydrated super sulphated cement", *Cement and Concrete Research*, 1(1), pp. 101–104. doi: 10.1016/0008-8846(71)90086-X.
- Noor-ul-Amin (2014), "An overview on comparative study of alternatives for Ordinary Portland cement", *J. Basic. Appl. Chem*, 4(6), pp. 15–22.
- ONNCCE (2014), *NMX-C-414-ONNCCE, Building industry - hydraulic cement -specifications and testing methods*.
- Prasad, J. *et al.* (2006), "Factors Influencing The Sulphate Resistance of Cement Concrete and Mortar", *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 7(3), pp. 259–268.
- Quanlin, N., Rui, Z. (2015), "Experimental study on some properties of a low-carbon cement", in *International Conference on Advances in Energy and Environmental Science*, pp. 1440–1443.
- Rubert, S. *et al.* (2018), "Hydration mechanisms of supersulfated cement: The role of alkali activator and calcium sulfate content", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. Springer

- Netherlands, 134(2), pp. 971–980. doi: 10.1007/s10973-018-7243-6.
- Sadique, M. *et al.* (2012), "A new composite cementitious material for construction", *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 35, pp. 846–855. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.107.
- Shi, C., Jiménez, A. F., Palomo, A. (2011), "New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement", *Cement and Concrete Research*. Elsevier B.V., 41(7), pp. 750–763. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.016.
- Taylor, H. F. W. (1998), *Cement chemistry*. 2nd edn, *Cement and Concrete Composites*. 2nd edn. Thomas Telford Publishing. doi: 10.1016/S0958-9465(98)00023-7.
- V.P. Mehrotra, Sai, A. S. R., Kapur, P. C. (1982), "Plaster of Paris activated supersulphated slag cement", *Cement and Concrete Research*, 12(4), pp. 463–473.
- Wojceich, P., Marczewska, J., Jaworska, M. (1985), "Some Aspects and Mechanisms of sulphate attack", *Structure*, pp. 19–24.
- Wolfe, W. E. *et al.* (2001), "The Effect of Ettringite Formation on Expansion Properties of Compacted Spray Dryer Ash", in *International Ash Utilization Symposium*.
- Woltron, G. (2009), "The utilisation of GGBFS for advanced supersulfated cements", *World Cement*.