

## **Efeito da sílica sol-gel de alta área superficial na estrutura de pastas cimentícias com baixo fator água/cimento**

*Effect of silica sol-gel of high surface area on the structure of cement pastes with low factor water/cement*

Michelle Cristina de Freitas Costa (1); Andréia Bicalho Henriques (2); Manuel Houmard (3)

(1) *Especialista, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG*

(2) *Professora Doutora, Departamento de Engenharia de Minas - DEMIN*

(3) *Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção - DEMC*

*Av. Presidente Antonio Carlos, 6.627, EE-UFMG/DEMC, Bloco I, 3º andar, sala 3304, Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP: 31.270-901  
michelle.engenharia@yahoo.com.br*

### **Resumo**

O efeito da sílica sol-gel de alta área superficial, na estrutura de pasta de cimento Portland de alta resistência inicial e com baixo fator água/cimento, foi analisado. Duas sílicas de alta área superficial (S1 e S2), nano-estruturadas, foram sintetizadas pela tecnologia sol-gel, caracterizadas e usadas em substituição à sílica ativa (SA) nas pastas de cimento. A hidratação das pastas cimentícias foi estudada através de DRX ao longo do processo de cura. A resistência à compressão das pastas cimentícias com os aditivos pozolânicos, sílica sol-gel e sílica ativa, foi avaliada em regime de cura de sete e quatorze dias. Medições de densidade e de porosidade pelo princípio de Arquimedes também foram realizadas a fim de discutir as variações estruturais nas amostras. Os resultados mostraram que houve evoluções estruturais semelhantes nas pastas cimentícias, ao longo do processo de cura, ao usar fatores de água/cimento parecidos. Entretanto, as sílicas sol-gel de alta área superficial (S1 e S2) apresentaram ter um poder pozolânico significativo e, no caso de S1, superior ao da sílica ativa comercial (SA). Além disso, amostras de pastas cimentícias produzidas com a sílica sol-gel S2, apresentaram propriedades mecânicas, de resistências à compressão, superiores as amostras produzidas com as outras sílicas estudadas. Tal fato ocorreu porque a sílica S2 associou uma maior produção de C-S-H hidratado, devido à reação pozolânica e, uma estrutura menos porosa, devido a um fator água/cimento mais baixo.

*Palavra-Chave: pasta cimentícia, aditivo pozolânico, sílica ativa, sílica sol-gel, alta área superficial.*

### **Abstract**

The effect of sol-gel silica of high surface area on the structure of Portland cement pastes of high initial strength and low factor water/cement was analyzed. Two high surface area silicas (S1 and S2), nanostructured, were synthesized by sol-gel technology, characterized and used in substitution of silica fume (SA) in the cement pastes. The hydration of the cement pastes were studied by DRX during the curing process. The compressive strength of cement pastes with pozzolanic additives, sol-gel silica and silica fume, was evaluated in cure system of seven and fourteen days. Measurements of density and porosity by the Archimedes principle were also performed in order to discuss the structural variations on the samples. The results showed that there were similar structural evolution on the cement pastes, during the curing process, when using close factor water/cement. However the sol-gel silicas with high surface area (S1 and S2) have presented a significant pozzolanic activity and, in the case of S1, superior to the commercial silica fume (SA). Besides, samples of cement pastes produced with sol-gel silica S2, presented mechanical properties, compressive strength, superior to those samples produced with other silicas studied. This happened because the silica S2 associated an increased production of hydrate C-S-H, due the pozzolanic reaction and, a less porous structure, due to a lower factor water/cement.

*Keywords: cement paste, pozzolanic additive, silica fume, sol-gel silica, high surface area.*

## 1 Introdução

O processo sol-gel, de um modo geral, é uma síntese química, na qual envolve a produção de uma suspensão de partículas sólidas em um meio líquido, sol, que se transforma através de uma complexa rede tridimensional, em uma suspensão coloidal de partículas líquidas em um meio sólido, gel (BRINKER; SCHERER, 1990). No processo sol-gel as partículas sólidas formadas possuem diâmetro de poucas dezenas ou centenas de nanômetros, sendo assim tal processo, um dos processos de produção de nanomateriais.

A sílica produzida pelo processo sol-gel, denominada sílica sol-gel, por se tratar de um material nano-estruturado, uma vez aplicada em materiais cimentícios é capaz de permitir um melhor controle da microestrutura da matriz cimentícia, fazendo com que o material seja mais resistente e durável (GLEIZE, 2010).

Assim como a sílica ativa ( $\text{SiO}_2$  amorfa), que é um subproduto da fabricação de silício a partir de quartzo de elevada pureza, a sílica sol-gel também deveria ser um material pozolânico muito reativo (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A Pozolana, uma vez adicionada ao cimento e em presença de água, é capaz de favorecer e muito o processo de hidratação deste, pois reage quimicamente com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , produto da hidratação do cimento à temperatura ambiente, para formar C-S-H, composto com propriedades cimentícias (DAL MOLIN, 2011). Essa reação modifica a reação interna da pasta de cimento hidratada, reduzindo a porosidade capilar, diminuindo o calor de hidratação, evitando fissuras de origem térmica, um melhor empacotamento das partículas, maior densidade e maior resistência à compressão (DAL MOLIN, 2011; RICHARD; CHEYREZY, 1995).

A diminuição do fator água/cimento também possibilita a redução da porosidade promovendo o aumento da resistência mecânica e da durabilidade (GARCIA, 2015). A técnica de usar um baixo fator água/cimento aliada ao uso de sílica ativa, visando um melhoramento da matriz cimentícia, tem sido difundida na produção de concreto de pós reativos e, com isso tem-se conseguido um material com alto desempenho capaz de atingir resistência à compressão com valores superiores a 200 MPa (RICHARD; CHEYREZY, 1995; CHEYREZY; MARET; FROUIN, 1995). A resistência à compressão por sua vez, é uma propriedade, mecânica, muito relevante no controle de concretos porque serve como referência para avaliar a qualidade do próprio concreto (VANDERLEI; GIONGO, 2006).

Tem-se por hipótese que, outra forma de melhorar a microestrutura da matriz cimentícia e consequentemente melhorar as suas propriedades, seja aliar um baixo fator água/cimento ao uso de uma sílica de alta área superficial. Quanto maior for a área superficial da sílica utilizada em pasta de cimento, o processo de hidratação do cimento será ativado ainda mais, devido ao fato de ter mais área disponível para ocorrer as reações pozolânicas.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é analisar o efeito da sílica sol-gel de alta área superficial, em substituição a sílica ativa em pasta de cimento Portland de alta resistência inicial e com baixo fator água/cimento. Para isso, as amostras produzidas, foram

caracterizadas neste trabalho por ensaios de DRX, resistência à compressão e medidas de densidade e de porosidade pelo princípio de Arquimedes.

## 2 Materiais e Métodos

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial, tipo CPV-ARI (ABNT NBR 5733:1991) fornecido pela Brennand Cimentos. Esse cimento possui uma massa específica de 3,11 g/cm<sup>3</sup> e diâmetro médio de partículas de 10,03 µm. A sílica ativa (SA) utilizada, foi fornecida pela Technosil e, apresenta massa específica de 2,40 g/cm<sup>3</sup> e diâmetro médio de partículas de 15,09 µm. Foram utilizadas ainda duas sílicas de alta área superficial, sintetizadas pelo processo sol-gel, aditivo superplastificante líquido a base de éter policarboxílico, com taxa de redução de água em torno de 40%, e água disponibilizada pela rede pública de abastecimento de água. A composição química quantitativa dos materiais pulverulentos utilizados nesta pesquisa esta indicada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do cimento Portland tipo CPV-ARI, da sílica ativa e das sílicas produzidas por tecnologia sol-gel(GARCIA, 2015; SALES, 2014).

	CP V-ARI (%)	Sílica Ativa (%)	Sílica Sol-Gel
CaO	56,47	0,97	Sílica pura com traços de resíduos orgânicos
SiO <sub>2</sub>	24,59	94,70	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,19	0,24	
MgO	2,43	1,29	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0,07	
TiO <sub>2</sub>	—	0,03	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—	0,09	
Na <sub>2</sub> O	—	0,22	
K <sub>2</sub> O	—	0,72	
MnO	—	0,02	
*SO <sub>3</sub>	2,60	—	
CO <sub>2</sub>	2,74	—	
PF	3,50	2,81	
RI	1,00	—	

\* Quando C<sub>3</sub>A do Clínquer <8%

Inicialmente foram sintetizadas em laboratório duas sílicas, S1 e S2, de alta área superficial, através do processo sol-gel. Os reagentes utilizados na produção das sílicas S1 e S2 foram ortosilicato de tetraetil (TEOS), álcool etílico (Etanol), água deionizada e ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), cuja proporção dos reagentes (TEOS/Etanol/H<sub>2</sub>O/HNO<sub>3</sub>) é dada pelas razões molares 1/4/4/0 para S1 e 1/4/4/0,001 para S2(HOUMARD et al., 2014). As sílicas usadas neste trabalho, S1, S2 e sílica ativa, foram caracterizadas pela determinação da área superficial específica, tamanho médio de poros e volume específico de poros através

da técnica de adsorção de nitrogênio, método B.E.T., em equipamento Quantachrome Instruments (Nova 1200e Surface Area & Pore Size Analyzer).

Posteriormente, quatro lotes de amostras de pastas cimentícia foram moldados, sendo eles AI, AII, AIII e AIV. Todos os lotes de amostras foram moldados em sequência, no mesmo dia e sob as mesmas condições. Os materiais e suas respectivas proporções, utilizados em cada lote de amostras, constam na Tabela 2.

Tabela 2 – Materiais utilizados em cada lote de amostras e suas respectivas proporções em percentual de peso, calculado a partir da massa de cimento usado.

<b>Materiais</b>	<b>AI</b>	<b>AII</b>	<b>AIII</b>	<b>AIV</b>
Cimento CP V-ARI	1	1	1	1
Sílica Ativa (SA)	25%	—	—	—
Sílica Sol-Gel 1/4/4/0 (S1)	—	25%	—	—
Sílica Sol-Gel 1/4/4/0,001 (S2)	—	—	25%	—
Superplastificante	3%	3%	3%	3%
Água	35%	37%	30%	30%

Os materiais foram pesados em balança de precisão e misturados em argamassadeira, alternando-se baixa e alta rotação. Na produção de todos os lotes de amostras, seguiu-se a sequência de primeiramente misturar os pós, em seguida adicionar o superplastificante diluído em parte da água a ser utilizada no processo e, finalmente acrescentar o restante da água até que as pastas cimentícias chegassem à reologia adequada para moldar as amostras. Notou-se que AI e AII necessitaram de uma porcentagem maior de água para atingir essa reologia (ver Tabela 2).

As pastascimentícias foram colocadas em fôrmas cilíndricas de PVC, com dimensões de 5 cm de altura e 2 cm de diâmetro interno e cobertas com filme plástico transparente para reter a umidade. Após 24h as amostras foram retiradas dos moldes e levadas para cura submersa em água a temperatura ambiente. Os testes de resistência à compressão foram realizados aos 7 e 14 dias de cura, em uma prensa hidráulica computadorizada, seguindo a ABNT NBR 5739:2007. Medidas de Arquimedes foram realizadas após a cura de 14 dias com secagem em temperatura ambiente e com secagem em estufa a 90 °C.

As amostras foram moídas, preparadas e submetidas a análises semiquantitativas por difração de raios X (DRX), realizadas em um difratômetro Philips-Panalytical modelo EMPYREAN, utilizando radiação CuK $\alpha$  e monocromador. O método de análise se baseou na comparação dos valores das distâncias interplanares e das intensidades dos picos nos difratogramas das amostras analisadas e uma amostra de referência, utilizando o padrão do banco de dados PDF-2 Release 2010 do ICDD – International Centre for Diffraction Data e o software X'Pert HighScore versão 2011.

### 3 Resultados

As medidas de área superficial específica, tamanho médio de poros e volume específico de poros, obtidas através do ensaio de adsorção de nitrogênio, são mostradas na Tabela 3. De um modo geral, as sílicas sol-gel sintetizadas, S1 e S2, apresentaram ser mais porosas do que a sílica ativa(SA) e possuir área superficial consideravelmente maior (aproximadamente 20 a 30 vezes superiores). Constatou-se ainda que S2 possui maior área superficial específica, menor tamanho médio de poros e menor volume específico de poros em comparação a S1. Tais características constatadas indicam a produção de uma sílica com poros muito finos, mas em quantidade muito relevante. Em contrapartida, SA parece ter poucos poros na sua estrutura.

É importante ressaltar que, a adsorção de nitrogênio só permite identificar poros de tamanho inferior a 140 nm aproximadamente e, desta forma provavelmente omiti as informações sobre os poros de dimensões maiores, mas possivelmente presentes nas estruturas ou entre as partículas das sílicas usadas neste trabalho. Essa omissão pode explicar o fato de SA ter necessitado de uma quantidade de água quase similar a S1 para que a pasta cimentícia pudesse ser moldada corretamente, mesmo SA tendo apresentado na caracterização por adsorção de nitrogênio um volume específico de poros bem inferior ao volume de poros de S1 e S2.

Tabela 3 – Área superficial específica, tamanho médio de poros e volume específico de poros da sílica ativa e das sílicas sol-gel, medidas por adsorção de nitrogênio.

Amostra	Área Superficial Específica (m <sup>2</sup> /g)	Tamanho Médio de Poros (nm)	Volume Específico de Poros (cc/g)
Sílica Ativa (SA)	19,4	12,906	0,063
Sílica Sol-Gel 1/4/4/0 (S1)	402,4	7,141	0,719
Sílica Sol-Gel 1/4/4/0,001 (S2)	582,1	2,277	0,331

Os difratogramas apresentados na Figura 1 mostram as principais fases cristalinas presentes nas amostras AI, AII, AIII e AIV ao longo do processo de hidratação das pastas cimentícias. Todas as amostras apresentaram picos representativos da presença de C-S-H (silicato de cálcio Hidratado), C<sub>2</sub>S (belita), C<sub>3</sub>S (alita), Ca(OH)<sub>2</sub> (portlandita) e C<sub>6</sub>As<sub>3</sub>H<sub>32</sub> (etringita). Constatou-se que os picos de cimento não hidratados (C<sub>2</sub>S e C<sub>3</sub>S) estão superpostos na mesma posição que os picos de cimento hidratado (C-S-H).

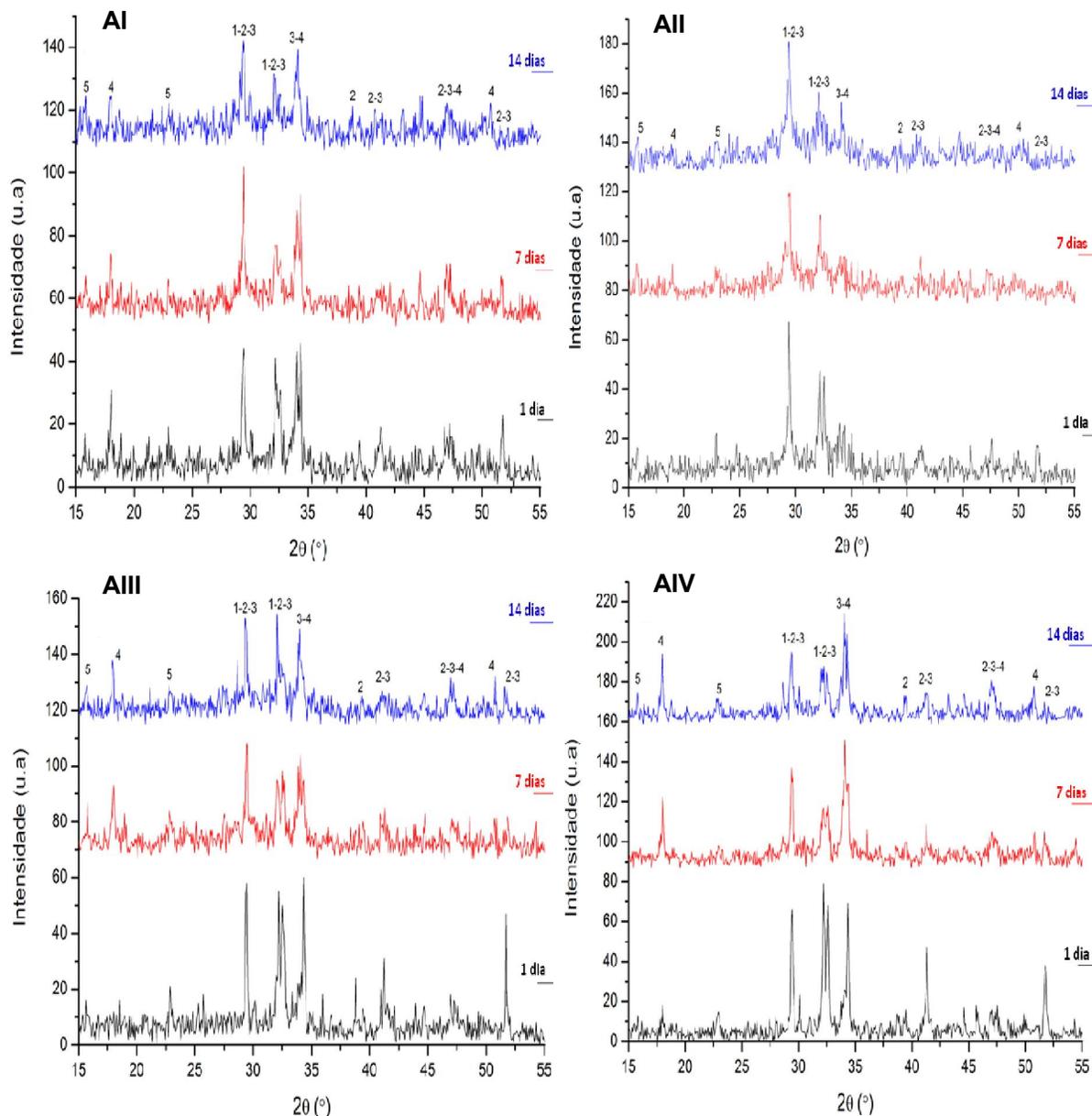


Figura 1 – Difratomogramas de DRX dos lotes de amostras AI, AII, AIII e AIV após cura de 1, 7 e 14 dias. Os picos são identificados com a seguinte legenda: (1) C-S-H, (2)  $C_2S$ , (3)  $C_3S$ , (4)  $Ca(OH)_2$  e (5)  $C_6As_3H_{32}$ .

Medidas realizadas pelo princípio de Arquimedes permitiram calcular a densidade volumétrica, porosidade total e porosidade aberta das pastas de cimento produzidas, conforme descrita na Tabela 4. Foram feitas medidas após secagem em temperatura ambiente e após secagem em estufa a  $90^\circ C$ . A massa específica do cimento, de  $3,11 \text{ g/cm}^3$ , foi usada como sendo a massa específica teórica da química das

partículas cimentícias após sua hidratação, para assim aproximar a porosidade total das amostras.

Tabela 4 – Porosidade e densidade, após 14 dias de cura, medidas pelo princípio de Arquimedes e pelas dimensões geométricas do peso das amostras.

Amostras secadas a temperatura ambiente				Amostras secadas por 3 dias em estufa a 90 °C	
Amostra	Densidade Volumétrica (g/cm³)	Porosidade Total (%vol.)	Porosidade Aberta (%vol.)	Porosidade Total (%vol.)	Porosidade Aberta (%vol.)
AI	2,12 ± 0,13	26,39 ± 0,36	3,65 ± 0,28	32,07 ± 0,34	12,96 ± 1,36
AII	1,84 ± 0,02	35,62 ± 2,16	8,39 ± 2,22	42,59 ± 0,18	25,29 ± 0,37
AIII	2,09 ± 0,01	24,65 ± 0,85	2,91 ± 0,88	30,48 ± 0,36	17,47 ± 0,05
AIV	2,13 ± 0,05	31,44 ± 1,54	3,14 ± 1,49	36,46 ± 1,54	19,62 ± 0,98

Por fim, a Figura 2 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, realizados nos lotes de amostras AI, AII, AIII e AIV aos 7 dias e 14 dias de cura submersa em água a temperatura ambiente.

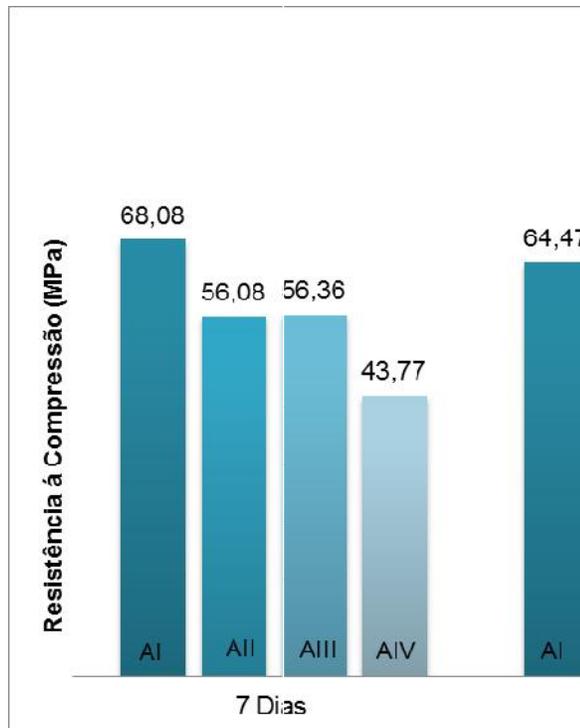


Figura 2 – Resistência à compressão das pastas cimentícias com regime de cura aos 7 dias e 14 dias.

## 4 Discussões

Observando a Figura 1, no difratograma da amostra AI, é possível notar que os picos de  $C_3S$  (alita) e de  $C_2S$  (belita) foram consumidos quase totalmente após 1 dia de hidratação. O pico intenso de  $Ca(OH)_2$  (portlandita) comprova essa conclusão. De 1 a 7 dias de cura, podemos observar a diminuição do pico de  $Ca(OH)_2$  (portlandita) indicando que a reação pozolânica está ocorrendo ao longo do envelhecimento da pasta de cimento e formando ainda mais C-S-H hidratado a partir da sílica ativa. Aos 7 dias e 14 dias de cura não parece ter havido evolução na estrutura da pasta de cimento da amostra AI.

No difratograma da amostra AII, tivemos um cenário bastante semelhante ao difratograma da amostra AIno que se refere ao consumo de  $C_3S$  (alita) e de  $C_2S$  (belita) e à formação de C-S-H hidratado e de  $Ca(OH)_2$  (portlandita). A diferença é que, em AII, a hidratação do cimento pareceu acontecer ligeiramente mais rápida e de maneira mais relevante, ou seja, a reação pozolânica foi consideravelmente mais rápida. De fato, o consumo de  $Ca(OH)_2$  (portlandita) pela sílica sol-gel S1 (1/4/4/0), aconteceu imediatamente após 1 dia de cura e de maneira simultânea à sua produção pelas reações de hidratação. Nos espectros de cura de 7 e 14 dias, não é visível qualquer modificação estrutural nas amostras produzidas com essa sílica sol-gel S1. Esse resultado pode ser em parte explicado pela razão de água/cimento um pouco superior quando se usou a sílica sol-gel S1, pois o mesmo favoreceria as cinéticas das reações de hidratação e pozolânica. Todavia, acreditamos principalmente que a alta área superficial da sílica nano-estruturada S1, seja responsável pelo grande aumento de reatividade pozolânica da pasta de cimento AII demonstrado nos difratogramas.

Nos difratogramas AIII e AIV da Figura 1, os picos de  $C_3S$  (alita) e de  $C_2S$  (belita) foram bem intensos após 1 dia de cura, indicando um processo de hidratação bem mais lento nessas pastas de cimento. Tal observação pode ser comprovada ainda, pelos picos de  $Ca(OH)_2$  (portlandita) muito fracos nos dois casos. Esse comportamento é atribuído aos fatores de água/cimento bem mais baixos usados para moldar essas pastas cimentícia (AIII e AIV), o que desfavorece a cinética das reações de hidratação. Aos 7 dias de cura, foi possível perceber que, o  $C_3S$  (alita) e o  $C_2S$  (belita) já não apareceram e, o  $Ca(OH)_2$  (portlandita) começou a aparecer, ou seja, houve hidratação do cimento. Apesar de nos dois casos, AIII e AIV, ter havido hidratação e formação de  $Ca(OH)_2$  (portlandita), a diferença foi que aos 7 dias e aos 14 dias, em AIII, onde foi usado sílica, os picos de  $Ca(OH)_2$  (portlandita) foram menores e, em AIV, onde não foi usado sílica, os picos de  $Ca(OH)_2$  (portlandita) foram mais intensos e tenderam a crescer. Associamos isso à reação pozolânica que, uma vez presente em AIII devido à presença de sílica, possibilitou uma maior formação de C-S-H. Essa observação comprova o poder pozolânico da sílica sol-gel, nano-estruturada, de alta área superficial S2 (1/4/4/0,001), embora por causa de um fator água/cimento bem inferior aqueles usados nas amostras AI e AII, não tenha sido possível comparar o poder pozolânico da sílica S2 com as outras sílicas usadas neste trabalho.

Os resultados de densidade e de porosidade das pastas cimentícias estudadas neste trabalho, apresentados na Tabela 4, mostraram logicamente que a amostra AII é a menos densa e também a mais porosa. Para as outras amostras a densidade pareceu ser bem similar (perto de  $2,10 \text{ g/cm}^3$ ), mas com variação de porosidade notável e sem tendência clara. Essas variações podem ser atribuídas a erros experimentais e de cálculos, especialmente no caso da amostra AIV que tem uma química bem distinta das outras pastas cimentícias estudadas, pelo fato de não ter sílica em sua composição e portanto, não ter consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  (portlandita). De fato, aos 14 dias houve uma fração relevante de  $\text{Ca(OH)}_2$  (portlandita) em AIV, o que não ocorreu nas outras amostras, no mesmo período. Considerando que AIV possui uma química diferente de AI, AII e AIII, provavelmente deveria ter sido usado um valor diferente de massa específica teórica das suas partículas, para avaliar a sua porosidade total.

Excluindo essa pasta cimentícia sem sílica, AIV, identificamos, e em acordo com a literatura, que a variação de porosidade total segue a seguinte relação de que quanto mais água na pasta cimentícia, mais poroso fica o material cimentício. Outro ponto identificado é que, o uso da sílica sol-gel, nano-estruturada, de alta área superficial tem tendência a deixar mais aberta a estrutura porosa da pasta de cimento hidratado em comparação com pasta de cimento moldada com sílica ativa. Notamos ainda, que a etapa de secagem tem uma influência importante sobre as medidas de porosidade nas estruturas cimentícias. Uma secagem mais intensa do material em estufa a  $90^\circ\text{C}$  durante vários dias revelou uma fração de poros mais importante nas pastas de cimentícias (Tabela 4).

Sobre a resistência à compressão, os lotes de amostras AI e AII, feitos com sílica ativa (SA) e sílica sol-gel 1/4/4/0 (S1) respectivamente, não apresentaram nenhuma diferença significativa nos valores de resistência à compressão entre 7 e 14 dias de cura. Isso corrobora os resultados observados na hidratação das pastas por DRX, apresentados na Figura 1, onde notamos que, não tem quase nenhuma evolução na estrutura cristalina aos 7 dias de cura para essas pastas.

No caso das amostras AIII e AIV, com fator água/cimento mais baixos, as medidas de resistência à compressão aos 14 dias de cura aumentaram de maneira relevante quando comparadas com os valores aos 7 dias. Mais uma vez, essa evolução das propriedades mecânicas segue os resultados de DRX, apresentados anteriormente, onde foi identificado que as reações de hidratação e pozolânica continuam a ocorrer aos 14 dias de cura para essas pastas. Assim, a produção de uma maior quantidade de C-S-H hidratado, pela hidratação do cimento, no caso da amostra sem sílica (AIV) e também pela reação pozolânica, no caso da amostra AIII, com sílica sol-gel 1/4/4/0,001 (S2), aumenta as resistências mecânicas das pastas cimentícias ao longo do processo de cura entre 7 e 14 dias. Este é um ponto fortemente positivo desta pesquisa, pois destaca que as medidas de resistências à compressão realizadas, apresentam ser muito coerentes com as observações realizadas por DRX ao longo do processo de cura.

Comparando os valores de resistência à compressão entre as diferentes pastas cimentícias, aos 14 dias de cura, observamos que os resultados parecem ser bem relacionados às medidas de porosidade previamente discutidas. De fato, mesmo tendo apresentado uma hidratação do cimento muito eficiente e uma reação pozolânica mais rápida, a amostra mais porosa (AII), produzida com a sílica sol-gel S1, que necessitou de mais água para ser moldada corretamente, apresentou a menor resistência à compressão. As pastas com sílica ativa (AI) e sem sílica (AIV) apresentaram valores de resistências à compressão semelhantes e intermediários, concordando com as medidas de porosidade intermediárias. Todavia, o melhor resultado mecânico foi aquele obtido pela pasta cimentícia menos porosa (AIII), onde houve o uso da sílica sol-gel S2, de razão molar 1/4/4/0,001. O valor de resistência à compressão encontrado neste caso, foi perto de 90 MPa aos 14 dias de cura conforme pode ser observado na Figura 2.

## 5 Conclusões

Pó de sílica nano-estruturada com alta área superficial foram produzidos pela tecnologia sol-gel e usados com sucesso na produção de pastas de cimento hidratado, fato comprovado pelas resistências à compressão de pelo menos ~50 MPa aos 14 dias de cura das pastas cimentícias desenvolvidas neste trabalho.

O difratograma das pastas cimentícias estudadas revelou que, as sílicas sol-gel de alta área superficial, com razões molares 1/4/4/0,001 e 1/4/4/0, usadas nas pastas de cimento em substituição à sílica ativa neste trabalho, apresentaram efeito pozolânico, uma vez que foi observado o consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  (portlandita), resíduo da reação de hidratação do cimento, ao longo da cura das pastas cimentícias.

As análises de DRX mostraram evoluções estruturais semelhantes ao longo do processo de cura das pastas cimentícias estudadas, quando se usou fatores de água/cimento parecidos. Entretanto, a sílica sol-gel de alta área superficial com razão molar 1/4/4/0 apresentou ter um poder pozolânico superior ao da sílica ativa comercial.

A sílica sol-gel de alta área superficial, com razão molar 1/4/4/0,001, possibilitou valores de resistências à compressão maiores do que a sílica sol-gel de razão molar 1/4/4/0, do que a sílica ativa e até mesmo do que a pasta cimentícia sem sílica. Supostamente pelo fato desta sílica sol-gel de razão molar 1/4/4/0,001 proporcionar uma sinergia entre uma reação pozolânica notável e uma estrutura mais compacta, devido a possibilidade de se usar teores de água inferiores durante a etapa de moldagem das amostras.

## 6 Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo apoio financeiro, à Brennand Cimentos e a Technosil pelos materiais cedidos e ao INCT-ACQUA pelos ensaios realizados.

## 7 Referências

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

BRINKER, C. J.; SCHERER, G. W. Sol Gel Processing. In: BRINKER, C. J.; SCHERER, G. W. (Eds.) **Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing**. San Diego: Academic Press, 1990. p.2-18.

CHEYREZY, M.; MARET, V.; FROUIN, L. Microstructural Analysis of RPC (Reactive Powder Concrete). **Cement and Concrete Research**. v.25, n.7, p.1491-1500, 1995.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Mineraias Para Concreto Estrutural. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2011. v.1, cap.12, p.345-380.

GARCIA, D. C. S. Análise da microestrutura de pasta de cimento Portland com tratamento térmico por meio de segmentação de imagens e ensaio de ultra-microdureza. 2015, 83p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Materiais e Construção) – Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Minas Gerais.

GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e Materiais de Construção. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010. v.2, cap.53, p.1719-1745.

HOUMARD, M. et al. Correlation between sol-gel reactivity and wettability of silica films deposited on stainless steel. **Applied Surface Science**. v.289, p.218-223, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008. p.674.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of Reactive Powder Concretes. **Cement and Concrete Research**. v.25, n.7, p.1501-1511, 1995.

SALES, F. A. Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland. 2014, 139p. **Tese** (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Minas Gerais.

VANDERLEI, R. D., GIONGO, J. S. Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas. **Tese** (Doutorado) – Escola de Engenharia de São



Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto  
CBC2016  
Outubro / 2016



@ 2016 - IBRACON - ISSN 2175-8182

Carlos da Universidade de São Paulo. Cadernos de Engenharia de Estruturas. São Carlos. v.8, n.33, p.115-148, 2006.