



6 a 8 de outubro de 2010 - Canela RS

ENTAC 2010

XIII Encontro Nacional de Tecnologia
do Ambiente Construído

VALORIZAÇÃO DE FONTES DE SULFATO DE CÁLCIO EM ARGAMASSAS FLUIDAS AUTONIVELANTES

Cecília Ogliari Schaefer (1); Janaíde Cavalcante Rocha (2); Malik Cheriaf (3)

(1) Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Brasil – e-mail: cissa.og@gmail.com

(2) Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Brasil – e-mail: janaíde@ecv.ufsc.br

(3) Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Brasil – e-mail: malik@valores.ufsc.br

RESUMO

O sulfato de cálcio que existe sob forma de di-hidrato ou gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de hemidrato ou gesso de Paris ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) e anidrita (CaSO_4), é um produto que tem inúmeras aplicações comerciais. Entretanto, possui um fator limitante que é sua solubilidade à água. Dentro deste contexto, a pesquisa tem por objetivo a valorização de fontes alternativas de sulfato de cálcio em argamassas fluidas autonivelantes, utilizando como aglomerante o cimento aluminoso. Essas misturas onde são utilizados cimento aluminoso e sulfato de cálcio são denominadas de sistemas etringíticos, sendo este o principal hidrato formado de sua reação com água. A formação de etringita à curto prazo resulta em pega e endurecimento rápido e também permite a utilização do material em poucas horas. Entretanto, um dos desafios consiste não só numa formulação otimizada, mas também identificar se a matriz formada é passível de degradação em água. Em estudo com anidrita sintética percebe-se que com 5% de cimento aluminoso a argamassa já apresenta uma certa melhora quanto à insensibilização à água após ensaio de degradação por ciclos de imersão e imersão-secagem. Quando se adiciona, além do cimento aluminoso, 12% de escória de alto-forno os resultados são ainda melhores. Os resultados da análise térmica diferencial (ATD) e da difração de raios X (DRX) mostram que a escória de alto-forno é ativada na hidratação da anidrita formando uma maior quantidade de gesso, gerando uma microporosidade e favorecendo uma melhor resistência à degradação. Ainda, através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi possível observar a formação da etringita nas amostras com escória de alto-forno curadas durante 28 dias. A pesquisa ainda mostra que ativadores tais como $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e sulfato de potássio são extremamente importantes para a ativação da hidratação da anidrita que é um material de pega lenta.

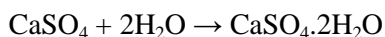
Palavras-chave: cimento aluminoso, sulfato de cálcio, argamassa autonivelante.

1 INTRODUÇÃO

A constante inovação tecnológica trouxe à indústria da construção materiais cada vez mais complexos. Atualmente, uma grande quantidade de produtos à base de cimento estão disponíveis, sendo que o cimento Portland é o aglomerante hidráulico mais comum. Entretanto, alguns estudos são conduzidos com misturas ternárias de cimento Portland, cimento Aluminoso e sulfato de cálcio empregados com o intuito de acelerar a pega e resistência a partir da formação da etringita (Kighelman (2007) ; Lamberet (2005)). Esses sistemas são conhecidos como etringíticos já que a etringita é o principal hidrato formado. A produção desses materiais visa o desmolde e utilização à curto prazo, tendência mundial num modelo de economia em que o fator tempo é precioso.

O sulfato de cálcio que existe sob forma de di-hidrato ou gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de hemidrato ou gesso de Paris ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) e anidrita (CaSO_4), é um produto que tem inúmeras aplicações comerciais. Um fator limitante da aplicação do sulfato de cálcio é sua solubilidade à água. Desta forma, algumas pesquisas vem sendo conduzidas abordando a insensibilização do sulfato de cálcio em água, visando a melhoria dessa característica (Kuryatnyk, 2007).

A hidratação da anidrita ortorômbica implica na formação do sulfato de cálcio di-hidratado (gesso), conforme reação abaixo:



A capacidade da anidrita reagir com água e se transformar em gesso é o encorajamento de sua utilização em produtos de construção. Entretanto, deve-se ressaltar que esse processo de conversão em gesso é bastante lento. A reatividade da anidrita pode ser melhorada através da utilização de ativadores (Sievert *et al.*, 2005).

Os ativadores são os produtos seguintes: a) sulfato de sódio (Na_2SO_4 et NaHSO_4), de potássio (K_2SO_4 et KHSO_4), de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), de zinco (Zn_2SO_4), de ferro (FeSO_4) e ainda sulfatos duplos como $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$; b) bases : cal $\text{Ca}(\text{OH})_2$, soda NaOH ; c) o clínquer de cimento Portland, escória granulada, o cimento de alto-forno, as cinzas volantes de lignina ricas em cal, os clínqueres com alto teor de sulfato.

O mecanismo de ação dos ativadores, no caso dos sulfatos, é a formação de um sal duplo do tipo singenita, por exemplo ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), no caso do emprego do K_2SO_4 . Na presença de K_2SO_4 , a hidratação da anidrita para a formação do gesso é reforçada consideravelmente e a morfologia de cristalização do gesso muda (Murat, 1977).

O cimento aluminoso é composto de aproximadamente 40% de alumina, 40% de cálcio, 15% de óxidos ferrosos e férricos e 5% de silício, ainda podem estar presentes também pequenas quantidades de TiO_2 , de MgO e álcalis (Neville, 1997).

A diferença fundamental entre o cimento Portland e o cimento aluminoso é a sua natureza ativa que conduz à pega e endurecimento. O cimento Portland contém como óxidos principais o cálcio (CaO) e o silício (SiO_2), sob a forma de silicato tricálcico e dicálcico (C_3S et C_2S). A partir de sua reação com água, os principais hidratos formados são o silicato de cálcio hidratado (CSH) e o hidróxido de cálcio (CH). O cimento aluminoso contém CaO e Al_2O_3 como óxidos principais que se combinam e originam o aluminato monocálcico (CA) que reage com água e forma o aluminato de cálcio hidratado (Scrivener *et al.* 1999).

A hidratação de misturas a base de sulfato de cálcio e cimento aluminoso foram estudadas por vários autores (Lamberet, 2005; Evju e Hansen, 2005; Kighelman, 2007; Fernández-Carrasco e Vázquez, 2009; Onishi e Bier, 2010) com diferentes tipos de sulfato de cálcio, já que sua taxa de dissolução é um parâmetro essencial para a morfologia e distribuição espacial dos hidratos. Os estudos mostram que a formação da etringita e do gel de gibsita (AH_3) regem a hidratação de misturas de cimento aluminoso e sulfato de cálcio.

Quando o sulfato de cálcio se esgota a etringita pode reagir com a fase aluminato anidra e formar o monossulfato. O desenvolvimento dos hidratos depende das proporções relativas e do tipo de sulfato de cálcio utilizado (hemidrato, gesso ou anidrita). Lamberet (2005) coloca em evidência dois casos:

- Cimento aluminoso/ « sulfato de cálcio rápido » (gesso ou hemidrato): o sulfato de cálcio é mais rapidamente solubilizado em relação ao aluminato de cálcio, assim a solução torna-se rica em Ca^{2+} e SO_4^{2-} e deficiente em Al^{3+} . Cristais de etringita chamados de « short stubby » se formam preferencialmente na superfície dos grãos do cimento.
- Cimento aluminoso/ « sulfato de cálcio lento » (anidrita): o aluminato de cálcio hidratado se solubiliza mais rapidamente do que o sulfato de cálcio; a solubilização do sulfato de cálcio é um parâmetro limitante (solução pobre em SO_4^{2-}) e ela conduz ao crescimento de longas e finas agulhas de etringita.

As argamassas autonivelantes são bastante difundidas e comumente utilizadas em muitos países, como por exemplo, na França. Esses materiais autonivelantes possuem como característica principal a pega e edurecimento rápido (permitindo tráfego de pessoas a partir de 1 dia) e superfície plana e lisa. São produzidos, de forma geral, à base de sulfato de cálcio, especificamente a anidrita, apresentando desempenho mecânico à compressão de aproximadamente 20 MPa e à flexão de 4 MPa aos 28 dias de cura.

Assim sendo, o intuito da pesquisa é valorizar fontes de sulfato de cálcio para a produção de argamassa autonivelante. O presente artigo apresenta os resultados iniciais da pesquisa obtidos a partir de uma anidrita residual.

2 OBJETIVO

O artigo tem como objetivo apresentar os resultados iniciais sobre a insensibilização à água de misturas à base de cimento aluminoso e anidrita sintética.

3 METODOLOGIA

3.1 Preparação das argamassas autonivelantes

Para a preparação das argamassas autonivelantes os seguintes procedimentos foram adotados:

- Com a cuba da argamassadeira seca adicionam-se todos os materiais secos: areia, cimento, sulfato de cálcio e aceleradores em pó. A mistura é feita em velocidade lenta durante 1 minuto.
- Em seguida, adiciona-se a água e o aditivo superplastificante líquido. O superplastificante líquido é previamente diluído na água de mistura. Mistura-se por mais 1 minuto em velocidade baixa.
- Ao término dos 2 primeiros minutos, desliga-se a argamassadeira e homogeneiza-se manualmente todos os materiais dentro da cuba com o auxílio de uma espátula. Em seguida, mistura-se em velocidade baixa por 30 segundos.

3.2 Trabalhabilidade (*Flow*)

O ensaio de consistência baseia-se na norma inglesa EN 12706. Utiliza-se um cone de 7 cm de altura com diâmetro superior de 5,5 cm e inferior de 9,5 cm. O cone é disposto ao centro de uma placa plexiglas e preenchido com a argamassa autonivelante. O cone é retirado de uma só vez verticalmente, a argamassa espalha-se na placa permitindo a medida de dois diâmetros, dos quais resulta uma média da medida do espalhamento.

Para o ensaio de consistência em argamassas autonivelantes esse procedimento deve ser repetido a cada 30 minutos, remisturando a mistura em argamassadeira com velocidade lenta por 30 segundos. O ensaio tem duração de 3 horas. Os resultados apresentados representam a média da consistência em 3 horas.

3.3 Resistência à compressão

Corpos-de-prova prismáticos de dimensão 4 x 4 x 16 cm são utilizados para o estudo das resistências mecânicas obtidas pelas argamassas autonivelantes. Após 24 horas da mistura os corpos-de-prova são desmoldados e conservados em sala climatizada mantida à temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa superior ou igual à 50 %.

A resistência à compressão é verificada nas idades de 1 dia, 7 e 28 dias.

3.4 Sensibilidade à água

Os ensaios de degradação em água são efetuados após 28 dias de cura das argamassas autonivelantes. O procedimento é baseado na tese de Kuryatnyk (2007).

A taxa de degradação das misturas devido à ação do meio agressivo (água) e a influência dos ciclos de imersão e imersão-secagem são definidas como a relação entre a resistência mecânica do material após os ensaios de imersão e/ou imersão-secagem e a resistência em 28 dias.

$$k = \frac{R(28\text{dias}) - R(\text{ensaio})}{R(28\text{dias})}$$

$R(\text{ensaio})$: Resistência mecânica das amostras após 28 dias imersas em água ou 28 ciclos de imersão-secagem.

$R(28\text{dias})$: Resistência mecânica das amostras após 28 dias.

Se o coefficient k é superior à 0 : a estrutura do material é degradada.

Quando k é inferior ou igual à 0 : material considerado como resistente à ação da água ou à influencia dos ciclos de imersão-secagem.

3.4.1 Ensaio de imersão

Inicialmente, para o ensaio de imersão, determina-se a massa do corpo-de-prova após 28 dias de cura. Posteriormente, este mesmo corpo-de-prova deve ser disposto em um recipiente e imerso com água destilada. A massa da amostra deve ser determinada diariamente durante os 28 dias de ensaio. As informações sobre absorção ao longo do tempo são obtidas diariamente, podendo-se plotar uma curva acumulada referente à absorção de água. Ao final dos 28 dias de imersão a amostra é retirada da água e sua resistência mecânica é verificada após 24 horas, estando a amostra ainda úmida.

3.4.2 Ensaio de imersão-secagem

Para o ensaio de imersão-secagem determina-se a massa do corpo-de-prova após 28 dias de cura, e posteriormente colocá-lo em estufa à 35°C durante o período de 8 horas. Após esse tempo na estufa o corpo-de-prova deve ser disposto em um recipiente e imerso com água destilada durante 16 horas. Esse procedimento deve ser repetido diariamente até completar 28 ciclos de imersão-secagem. A massa da amostra deve ser mensurada diariamente durante os 28 ciclos de imersão-secagem. Ao final dos 28 ciclos de imersão-secagem a amostra é retirada da água e sua resistência mecânica é verificada após 24 horas, estando a amostra ainda úmida.

3.5 Estudo da microestrutura das argamassas autonivelantes

O estudo da microestrutura foi conduzido em pasta pura, sendo moldadas amostras em micro cilindros de 2 cm de diâmetro e 4 cm de altura. A relação água/sólido utilizada é igual a 0,33, escolhida a fim de evitar qualquer sedimentação e obter uma consistência nominal (norma francesa NFP 15-402).

As amostras são conservadas em condições endógenas durante 28 dias em sala climatizada à temperatura de 20°C e umidade de 50%. Para isto, após 24 horas da data de moldagem as amostras são embaladas em filme PVC e posteriormente inseridas em saco plástico, minimizando ao máximo a entrada de ar.

As seguintes técnicas foram utilizadas para a análise da microestrutura: difração de raios-X, microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise térmica diferencial (ATD), infravermelho.

4 MATERIAIS E MISTURAS

Foram estudadas argamassas autonivelantes produzidas com anidrita sintética proveniente da indústria de ácidos fortes.

A fim de verificar a insensibilização à água por parte do sulfato de cálcio, fez-se uma substituição em massa de sulfato de cálcio por cimento aluminoso e também filer calcário e escória de alto forno. A análise química do cimento aluminoso é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Análise química do cimento aluminoso

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Perda ao fogo
Cimento aluminoso	4,15	39,86	15,96	37,19	0,6	0,1	0,06	0,1	1,88	0,35	0,27	0,28

Como a anidrita é uma material de pega lenta foram utilizados como aceleradores sulfato de potássio e cal, em percentual de 1% em relação à massa de aglomerante. Uma goma para estabilização da reologia foi utilizada numa dosagem de 0,04% em todas as misturas.

Dois superplastificantes foram utilizados, um melamínico (M) e um policarboxílico (P).

A relação água/aglomerante foi mantida em 0,5 para todas as misturas.

O proporcionamento dos materiais utilizados nas misturas consta na Tabela 2.

Tabela 2 – Proporcionamento dos materiais nas misturas

%	M1	M2	M2A	M3	M4
Anidrita sintética	100	95	95	83	83
Cimento aluminoso	-	5	5	5	5
Filer Calcário	-	-	-	-	12
Escória de alto forno	-	-	-	12	-
Sulfato de potássio	1	1	1	1	1
Cal	1	-	1	1	1
Superplastificante	M	M	P	P	P

5 RESULTADOS

5.1 Consistência e resistência à compressão

Na Tabela 3 são apresentados os resultados de consistência e resistência à compressão das argamassas autonivelantes produzidas com anidrita sintética.

Observa-se que o superplastificante melamínico resulta em uma maior consistência, entretanto retarda a pega já que as argamassas – M1 e M2- quando este aditivo foi utilizado apresentaram resistência em idade de 1 dia com valor inferior a 1MPa.

Com o superplastificante policarboxílico a consistência manteve-se entre 20 e 21 cm e todas as misturas onde foi utilizado – M2A, M3, M4- e apresentaram melhor resposta mecânica, mesmo que com valores de resistência não muito altos, após 1 dia de cura.

Os resultados mostram também que o acréscimo de resistência ocorre principalmente até os 7 dias de cura e após esse período não foi verificado um ganho de resistência significativo.

A presença de cal auxilia no ganho de resistência nas primeiras horas. Na mistura em que a cal não foi utilizada a resistência à compressão foi inferior a 1 MPa, passando para 2,5 MPa na mistura M2A com adição da cal.

Tabela 3 – Características de consistência e resistência à compressão das argamassas autonivelantes

%	M1	M2	M2A	M3	M4
Consistência média (cm)	23,5	22	20	21	21
Resistência à compressão (MPa)					
1 dia	-	0,8	2,5	2	1,1
7 dias	18,7	15,6	16,7	17,9	12,7
28 dias	18,3	16,5	17	20,2	13,3



Figura 1 – Espalhamento obtido pela argamassa autonivelante M1 no tempo T=0

5.2 Avaliação da sensibilidade à água

A absorção de água apresentada pelas misturas ao longo dos 28 dias do ensaio de imersão é apresentada na Figura 2. A mistura M2, sem cal, apresentou maior absorção de água ao longo do ensaio. As misturas ternárias com escória de alto forno (M3) e filer calcário (M4) apresentaram uma absorção constante até os 12 primeiros dias de ensaio, mostrando posteriormente uma redução na absorção de água.

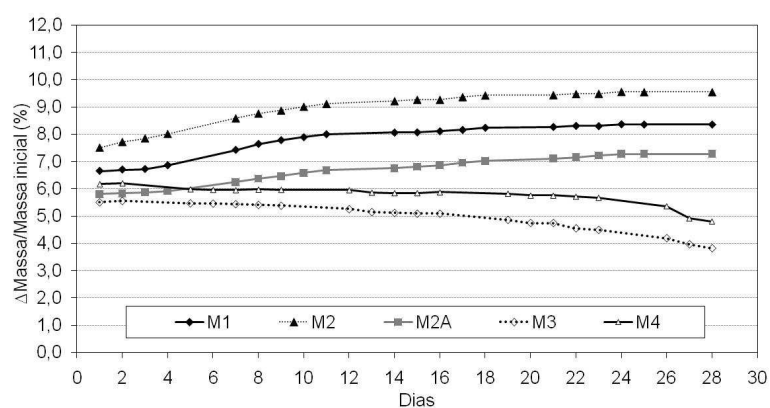


Figura 2 – Absorção de água ao longo dos 28 dias do ensaio de imersão

Após os ensaios de imersão e imersão-secagem a única amostra que apresentou uma degradação que pode ser observada visualmente foi a M2. Na Figura 3 observa-se o empenamento sofrido pelo corpo-de-prova prismático, e ainda, a fissuração logo após a camada superficial que é formada em função do superplastificante.

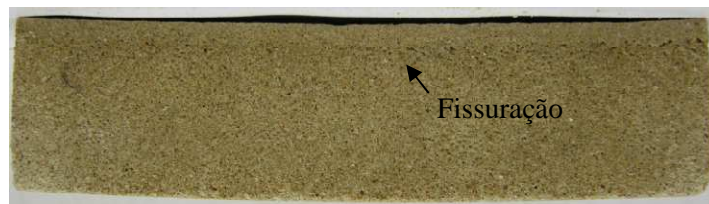


Figura 3 – Empenamento e fissuração observada na M2

A resistência à compressão apresentou uma queda significativa após os ensaios de sensibilidade, mostrando como as amostras são degradadas pela ação da água. Os valores de resistência à compressão, bem como, o coeficiente k calculado são apresentados na Figura 4.

Percebe-se que a substituição da anidrita por 5% de cimento aluminoso consegue insensibilizar a anidrita, entretanto essa dosagem pode não estar sendo a adequada já o coeficiente k para as amostras M2 e M2A é igual a 5,1 e 6,9 no ensaio de imersão e 6,5 e 6,9 para o ensaio de imersão-secagem, respectivamente.

Verifica-se que o melhor resultado foi obtido quando a anidrita foi substituída por 12% de escória de alto forno e 5% de cimento aluminoso, obtendo-se um coeficiente k igual a 4,8 e 4,7. Um ajuste na dosagem dessa mistura ternária pode melhorar ainda mais a sensibilidade da anidrita em água.

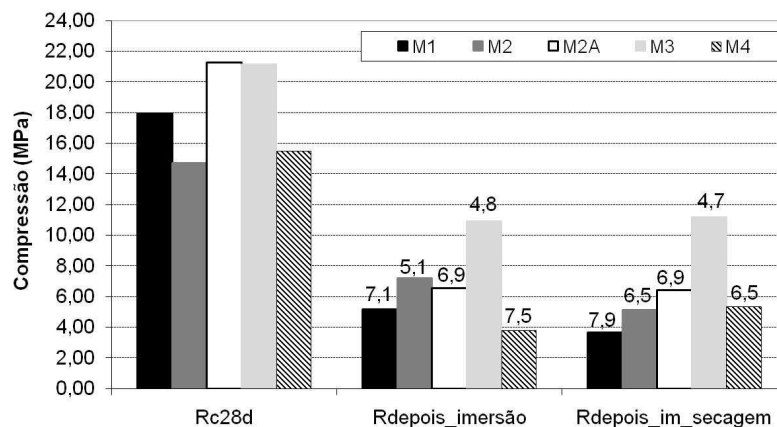


Figura 4 – Resistência à compressão das misturas aos 28 dias de cura (Rc28d), após 28 dias de imersão em água (Rdepois_imersão) e após 28 dias de imersão e secagem (Rdepois_im_secagem)

5.3 Análise térmica diferencial

A Figura 5 apresenta os resultados da análise térmica diferencial. A análise permite seguir os efeitos térmicos associados à desidratação do material decomposto nas seguintes condições: faixa de temperatura de 20 à 1100°C com velocidade de 10°C por minuto.

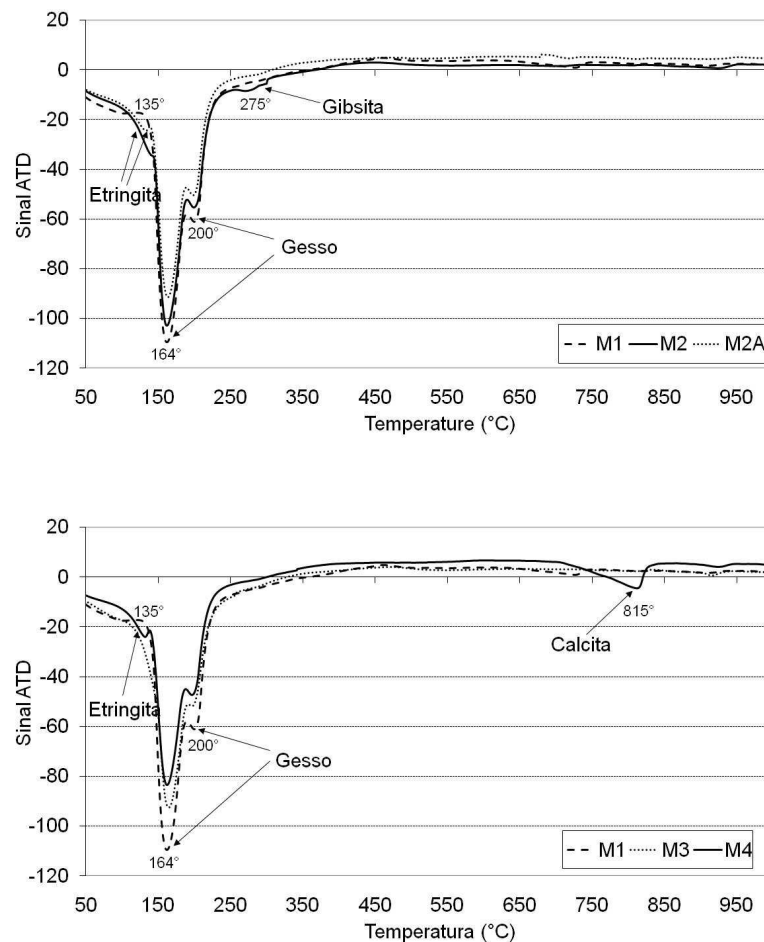
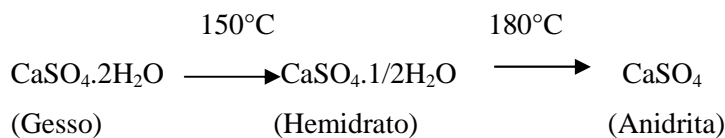


Figura 5 – Análise térmica diferencial das argamassas autonivelantes à base de anidrita

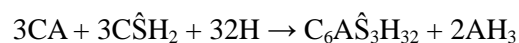
A análise dos termogramas mostra a decomposição do gesso conforme a seguinte equação:



Nas misturas observa-se a decomposição do gesso que ocorre em temperatura entre 164-200°C onde 1,5 moléculas de água se evaporam (formação do hemidrato) e em seguida à 200°C ocorre a evaporação de 0,5 molécula de água restante (formação da anidrita solúvel).

A temperatura de 135°C verifica-se um pico correspondente à decomposição da etringita $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ com 32 moléculas de água.

Uma pequena perturbação é verificada à 275°C mostrando a presença da gibsit (AH₃) na mistura M2 que não possui cal como constituinte. Isso confirma a equação de hidratação das misturas compostas por gesso e aluminato de cálcio (principal fase do cimento aluminoso):



Como a presença da cal acelera fortemente as reações nos primeiros minutos de hidratação, o pico de decomposição da etringita à 135°C é bem evidente na mistura M2A com cal.



A decomposição da calcita (CaCO_3) foi verificada à uma temperatura de 815°C na mistura M4, sendo

este pico característico em misturas com filer calcário.

Na mistura com escória de alto forno, M3, o pico de formação da etringita não se mostra com evidência, pois uma parte do gesso ativa a reação da escória ao invés de formar a etringita e o pico de decomposição se superpõe. Essa ativação da escória foi constatada no termograma realizado com a escória de alto forno anidra e a mistura anidra, já que o pico característico de decomposição da escória à 870°C não foi verificado na mistura após a hidratação (Figura 6).

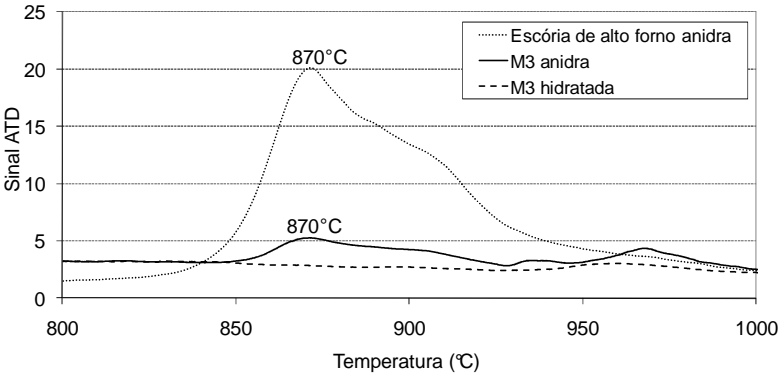


Figura 6 – Termograma da ativação da escória de alto forno

5.4 Difração de raios – X

A difração de raios-X revela que o principal produto de hidratação das misturas é o gesso, sendo os picos principais à $2\theta = 11,69^\circ, 20,75^\circ, 29,13^\circ$ et $31,18^\circ$ (Figura 7). Verifica-se também a anidrita ainda anidra em todas as misturas. Ainda, verifica-se a calcita na mistura M4 com filer calcário.

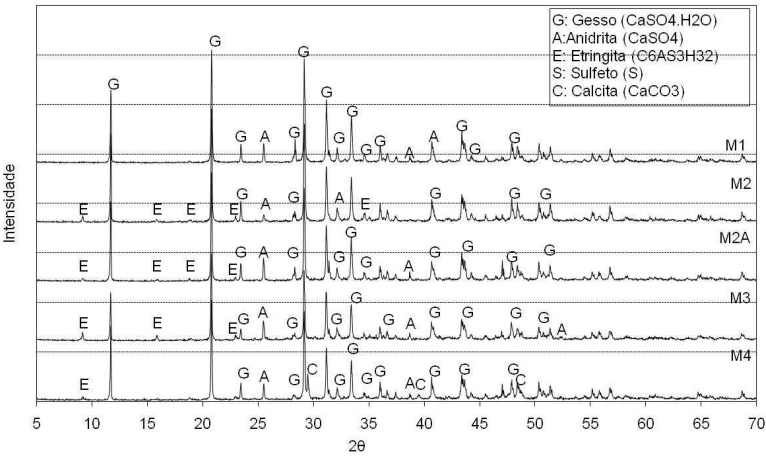


Figura 7 – Difratomogramas das misturas estudadas

Na Tabela 4 a média dos 4 principais picos do gesso obtidos na difração de raios-X. Observa-se que a cristalização do gesso é inferior na mistura M4, confirmando mais uma vez a ativação da escória de alto forno pelo gesso, como verificado na análise térmica diferencial (Figura 6).

Tabela 4 – Média das intensidades dos 4 principais picos do gesso

Mistura	Intensidade dos picos	Média
M1	680 ; 1147 ; 1058 ; 650	883,75
M2	770 ; 1158 ; 1001 ; 573	875,50
M2A	588 ; 1113 ; 957 ; 545	800,75
M3	261 ; 787 ; 704 ; 494	561,50
M4	521 ; 1026 ; 913 ; 540	750,00

5.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Através da observação feita pelo microscópio eletrônico de varredura pode-se visualizar uma grande cristalização de gesso e também a anidrita ainda anidra, confirmando os resultados da difração de raios-X. A cristalização do gesso foi beneficiada pelo efeito do sulfato de potássio utilizado como catalizador para sua formação e isso foi constatado através da formação da singenita que é um sulfato duplo de cálcio e potássio.

Com exceção da amostra M1 constituída somente de anidrita, não possuindo fonte de alumínio para a formação da etringita, em todas as demais amostras foi verificada a cristalização da etringita. Na amostra M3 com escória de alto forno já foi possível observar as agulhas de etringita, enquanto nas demais constatou-se o início da cristalização com partículas coloidais.

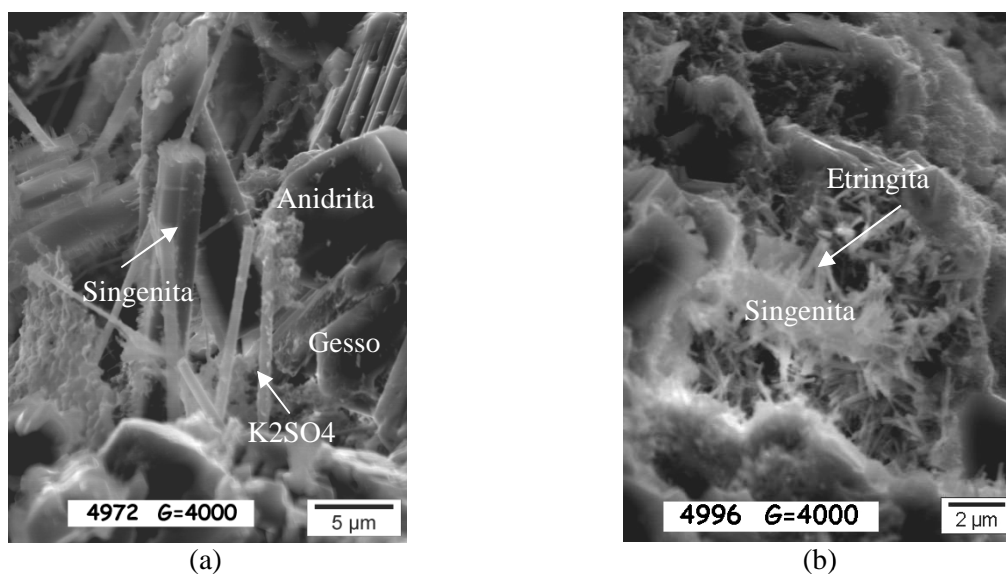


Figura 8 – (a) Mistura M1 com a cristalização da singenita e do gesso (b) Mistura M3 com a cristalização das agulhas de etringita

6 CONCLUSÕES

O superplastificante utilizado na argamassa autonivelante influencia na consistência, pois maiores valores foram obtidos com o superplastificante melamínico. Entretanto, ele retarda a pega não fornecendo resistência após 1 dia de cura.

A presença da cal nas misturas proporciona um ganho de resistência nas idades iniciais.

O sulfato de potássio é eficiente pois favorece a formação do gesso e conduz a formação da singenita.

A insensibilização do sulfato de cálcio pode ser obtida através de sua substituição parcial em massa por cimento aluminoso. A mistura M1 (100% anidrita), após o ensaio de imersão, apresentou um coeficiente de degradação k igual à 7,1, já com uma substituição de 5% por cimento aluminoso o coeficiente passou a 6,9 e ainda, quando utilizou-se também a escória de alto forno o coeficiente k passou para 4,8.

A escória de alto forno é ativada por uma parte do gesso formado ao longo da hidratação, conduzindo à uma insensibilização mais eficaz.

Esses resultados são motivadores à continuidade da pesquisa e estudo de uma dosagem ideal para a insensibilização do sulfato de cálcio em argamassas autonivelantes com utilização da escória de alto forno.

7 REFERÊNCIAS

EVJU, Cecilie; HANSEN, Staffan. Expansive properties of ettringite in a mixture of calcium aluminate cement, Portland and β -calcium sulfate hemihydrate. *Cement and Concrete Research* 31, 257-261, 2001.

KIGHELMAN, J. Hydration and Structure Development of Ternary Binder System as used in Self-Levelling Compounds. Tese. Lausanne : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007, 224 p.

KURYATNYK T., Insensibilisation à l'eau des mélanges à base de sulfate de calcium par ajout de clinker sulfo-alumineux. Tese. Lyon : INSA de Lyon, 2007, 246 p.

KURYATNYK, T.; ANGULSKI DA LUZ, C.; AMBROISE, J. PERA, J. Valorization of phosphogypsum as hydraulic binder. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, vol. 160, pp. 681–687.

LAMBERET T., Durability of ternary binders based on Portland Cement, Calcium Aluminate Cement and Calcium Sulfate. Tese. Lausanne : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005, 237 p.

MURAT M., Structure cristalochimie et réactivité des Sulfates de Calcium. **In** : Compte-rendu du Colloque International de la R.I.L.E.M. 25-27 mai 1977, Saint-Remy-Les-Chevreuse, France, pp. 59 - 173.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Ed. Pini, 2ª edição. São Paulo, 1997. 828 p.

ONISHI, K. BIER, T. A. Investigation into relations among technological properties, hydration kinetics and early age hydration of self-leveling underlayments. *Cement and Concrete Research*, 1999, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.03.004.

SIEVERT, T.; WOLTER, A.; SINGH, N. B. Hydration of anhydrite of gypsum ($\text{CaSO}_4\cdot\text{II}$) in a ball mill. *Cement and Concrete Research*, 2005, vol. 35, pp. 623 - 630.

SCRIVENER, K. L.; CABIRON, J-L.; LETOURNEUX, R. High-performance concretes form calcium aluminate cements. *Cement and Concrete Research*, 1999, vol. 29, pp. 1215-1223.

8 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq.

Ao Programa regional Mobilité Internationale Rhône-Alpes – MIRA.