

COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR SÍLICA ATIVA QUANDO EXPOSTAS AO ATAQUE POR SULFATO DE SÓDIO E MAGNÉSIO

*BEHAVIOR OF MORTARS PRODUCED WITH PARTIAL
REPLACEMENT OF CEMENT BY SILICA FUME WHEN EXPOSED
TO ATTACK BY SODIUM AND MAGNESIUM SULFATE*

Felipe Nogueira Torres

Mestrando, Universidade Federal de Minas Gerais

felipenogueiratorres@gmail.com

Aldo Giuntini de Magalhaes

Doutor, Universidade Federal de Minas Gerais

aldom@ufmg.br

RESUMO

Um desafio recorrente na construção civil é a durabilidade das estruturas de concreto inseridas em meios agressivos. É comum nestes ambientes a presença do íon sulfato que reage com os compostos hidratados da pasta de cimento endurecida. A presente pesquisa tem por objetivo comparar o comportamento de argamassas com a substituição parcial do cimento Portland por sílica ativa frente à degradação causada pelo ataque por sulfatos, por um período de exposição de 140 dias. Para isso, foram monitoradas as variações dimensionais lineares, a variação de massa e as propriedades mecânicas das amostras. Neste trabalho, foram preparadas duas misturas de argamassas: a de referência, confeccionada com cimento CPV – ARI e uma segunda mistura, onde se substituiu 10% da massa do cimento CPV – ARI utilizado no traço de referência por sílica ativa. As amostras foram expostas à três soluções distintas: $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ e $\text{MgSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$. Com a exposição das amostras nas soluções, os ensaios de variação dimensional linear e de massa foram realizados nos períodos de 2, 4, 6, 8, 10, 15 e 20 semanas de exposição. As leituras de resistência à compressão e tração na flexão foram executadas com base nos procedimentos estabelecidos na norma NBR 13279 (ABNT, 2005) nos períodos de exposição de 0 e 12 semanas. Esta pesquisa indicou que essa substituição foi benéfica apenas no caso do sulfato de sódio. Os resultados obtidos indicam que os ensaios complementares mostraram-se essenciais para a correta avaliação quanto a resistência do cimento ao ataque por sulfatos.

Palavras-chave: Ataque por sulfatos. Sílica Ativa. Variação dimensional linear. Variação de massa. Variação de resistência mecânica.

ABSTRACT

A recurring challenge in civil construction is the durability of concrete structures inserted in aggressive environments. It is common in these environments the presence of sulfate ion that reacts with the hydrated compounds of the hardened cement paste. This research aims to compare the behavior of mortars with the partial replacement of Portland cement by silica fume against the degradation caused by sulfate attack, for an exposure period of 140 days. For this, linear dimensional variations, mass variation and mechanical properties of the test specimens were monitored. In this work, two mixtures of mortars were prepared: the reference one, with cement type CPV - ARI and a second mixture, where 10% of the CPV-ARI cement mass used in the reference mix was replaced by silica fume. The samples were exposed to three different solutions: $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ and $\text{MgSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$. With the exposure of the samples in the solutions, the tests of linear dimensional variation and mass were carried out in periods of 2, 4, 6, 8, 10, 15 and 20 weeks of exposure. The readings of resistance to compression and traction in flexion were performed based on the procedures established in the NBR 13279 standard (ABNT, 2005) in the exposure periods of 0 and 12 weeks. This research indicated that this substitution was beneficial only in the case of sodium sulfate. The results obtained indicate that the complementary tests were essential for the correct evaluation regarding the resistance of the cement to the attack by sulfates.

Keyword: Sulfate attack. Silica fume. Linear dimensional variation. Mass variation. Variation of mechanical resistance.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil está em constante evolução, aperfeiçoando e inovando tanto seus processos construtivos quanto os materiais por ela utilizados, cabendo dentre estes, especial destaque os compósitos de matriz cimentícia elaborados com cimento Portland. Atualmente um dos principais desafios do setor da construção é a redução do consumo de recursos naturais e da emissão de poluentes. Dentro desse contexto, vem-se realizando, cada vez mais, a substituição parcial de cimento Portland por adições minerais (fillers, materiais pozzolânicos e escórias). Além dos benefícios ambientais inerentes, tais substituições reduzem o custo final do compósito, influenciando também na melhoria de sua trabalhabilidade no estado fresco, na redução das reações álcali-agregado, no aumento de sua resistência à fissuração e ao ataque de sulfatos.

Dentre as adições mais utilizadas estão as pozzolanas, sendo estas definidas como materiais inorgânicos, silicosos ou alumino-silicosos, que possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, porém quando divididas finamente e na presença de umidade, reagem quimicamente com $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formando compostos com propriedades cimentícias (MEHTA e MONTEIRO,

2014).

Neste trabalho substituiu-se parcialmente o cimento Portland por sílica ativa (SA), que há muito desperta o interesse dos pesquisadores devido à sua alta reatividade pozolânica, sendo esta, capaz de contribuir para a melhoria de certas propriedades dos compósitos cimentícios, tais como o aumento de sua resistência mecânica e a redução de sua estrutura de vazios (Zhang, *et al.*, 2016). A comunidade científica reconhece que a sílica ativa, quando utilizada na proporção correta na substituição parcial do cimento, aumenta de forma significativa a durabilidade das estruturas de concreto (A.C.I. COMMITTEE 234,1995).

Por sua vez o ataque por sulfatos, foco deste estudo, pode ser entendido como uma série de reações químicas entre íons sulfato e compostos hidratados da pasta de cimento endurecida. De acordo com Mehta e Monteiro (2014) a degradação dos compósitos de matriz cimentícia causadas por tais ataques, oriundos de fontes externas, se manifestam predominantemente de duas formas distintas, sendo elas a expansão e rachadura do concreto; e a perda de massa acompanhada por redução progressiva na resistência, devido à diminuição na coesão dos produtos de hidratação do cimento.

A pesquisa científica é essencial para se validar a eficácia da substituição parcial do cimento Portland por qualquer tipo de adição, visando a melhoria da durabilidade dos compósitos cimentícios frente ao ataque de agentes agressivos. Portanto, esta pesquisa tem como o principal questionamento a capacidade da sílica ativa em contribuir para a durabilidade das estruturas frente à ação dos sulfatos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram produzidos 24 corpos de prova de argamassa para cada mistura, totalizando 48, seguindo o traço padrão 1: 3,2: 0,6 (cimento: areia: a/c) estabelecido pela norma NBR 13583 (ABNT, 2014). Foram confeccionadas duas misturas de argamassas: a de referência (REF), confeccionada com cimento CPV – ARI e uma segunda mistura (CP10), onde se substituiu 10% da massa do cimento CPV – ARI utilizado no traço de referência por sílica ativa.

Para a moldagem foram utilizados cimento Portland tipo CPV–ARI (sem adições minerais), agregado miúdo natural (areia atendendo às prescrições da ABNT NBR 7214), sílica ativa (SA), aditivo superplastificante (SP) a base de éter policarboxilato (PCE) e água potável. Na Tabela 1 apresenta-se as quantidades, em massa, de cada material utilizado para produção de cada

mistura.

Tabela 1 - Quantidade em massa dos materiais utilizados nas argamassas

Mistura	Cimento (g)	Areia (g)	Água (g)	SA (g)	SP (%)
REF	500,0	1600,0	300,0	0,0	0,00
CP10	450,0	1600,0	300,0	50,0	0,20

As amostras foram divididas igualmente em 2 grupos com dimensões distintas. Grupo A, com dimensões de 25 x 25 x 285 mm e Grupo B, com dimensões de 40 x 40 x 160 mm. Foi necessária esta divisão devido aos diferentes ensaios realizados em cada grupo, conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2 - Ensaios realizados nas amostras de acordo com a divisão de grupos

Grupo A (25x25x285 mm)	Grupo B (40x40x160 mm)
Varição Linear	Resistência à Compressão
Varição de Massa	

O ensaio de resistência ao ataque por sulfatos de origem externa foi realizado com base nas diretrizes estabelecidas na norma NBR 13583 (ABNT, 2014). Foi avaliada a variação dimensional linear das amostras de argamassa do Grupo A quando submersas em soluções de sulfato de sódio (Na_2SO_4), sulfato de magnésio (MgSO_4) e água saturada com cal (referência), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição das soluções

Solução	Soluto (g)	Água (g)	Teor de Soluto (%)	Teor de SO_4^{2-} (g)	pH Médio
$\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	100,00	900,00	10,00	67,63	6,0
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	173,53	826,47	17,35(1) / 8,47(2)	67,63	6,0
$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}$	5,00	995,00	0,50	-	13,0

Neste estudo, a relação volume da solução agressiva pelo volume das barras de argamassa nos recipientes de cura foi de $(4 \pm 0,5)$, de acordo com a normatização adotada. As amostras submersas em solução foram acondicionadas em recipientes plásticos hermeticamente

fechados, colocados em estufa, à temperatura de (40 ± 2) °C, onde permaneceram por 140 dias (Grupo A) e 84 dias (Grupo B).

Devido ao prolongamento do período de exposição das amostras, em relação ao tempo especificado em norma (42 dias), foi necessário a substituição das soluções a cada 42 dias até o final do período de exposição, conforme indicado na Tabela 4. Essa troca foi adotada com intuito de garantir a quantidade de íons sulfato disponíveis e manter a agressividade do sistema.

Tabela 4 -Período de avaliação do ensaio de ataque por sulfatos e troca de soluções do sistema

Período de Avaliação do Ensaio de Ataque por Sulfatos											
0	14	28	42	56	70	84	98	112	126	140	
Período definido pela NBR 13583											
Período definido pela NBR 16697											
Período de Avaliação do Grupo A											
Período de Avaliação do Grupo B											
			1ª Troca de Soluções				2ª Troca de Soluções			3ª Troca de Soluções	

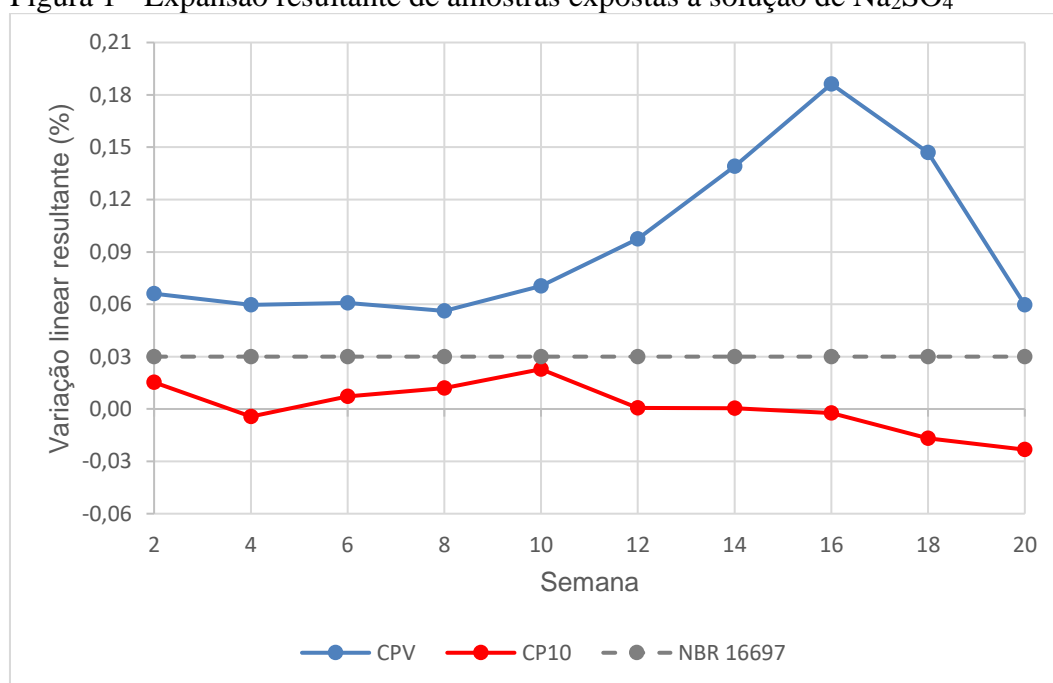
Os ensaios de resistência à compressão foram realizados após um período de tempo de exposição às soluções de 0 e 140 dias. A aferição da resistência à compressão foi executada com base nos procedimentos estabelecidos na norma NBR 13279 (ABNT, 2005), utilizando-se uma prensa SHIMADZU AGS-X com velocidade de carregamento de 100 N/s e capacidade de carga de 300 kN.

Somente as avaliações de variação dimensional não são capazes de identificar todos os efeitos causados pela alteração dos compostos hidratados do cimento. Por isso, foi analisada também a variação das massas das amostras a cada 2 semanas com o auxílio de uma balança digital com precisão de 0,1 g, após a estabilização da temperatura.

3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No gráfico da Figura 1 são apresentados os resultados de variação linear resultante das barras de argamassa do Grupo A, expostas à solução de sulfato de sódio, para o período de exposição de 20 semanas (140 dias).

Figura 1 - Expansão resultante de amostras expostas à solução de Na_2SO_4



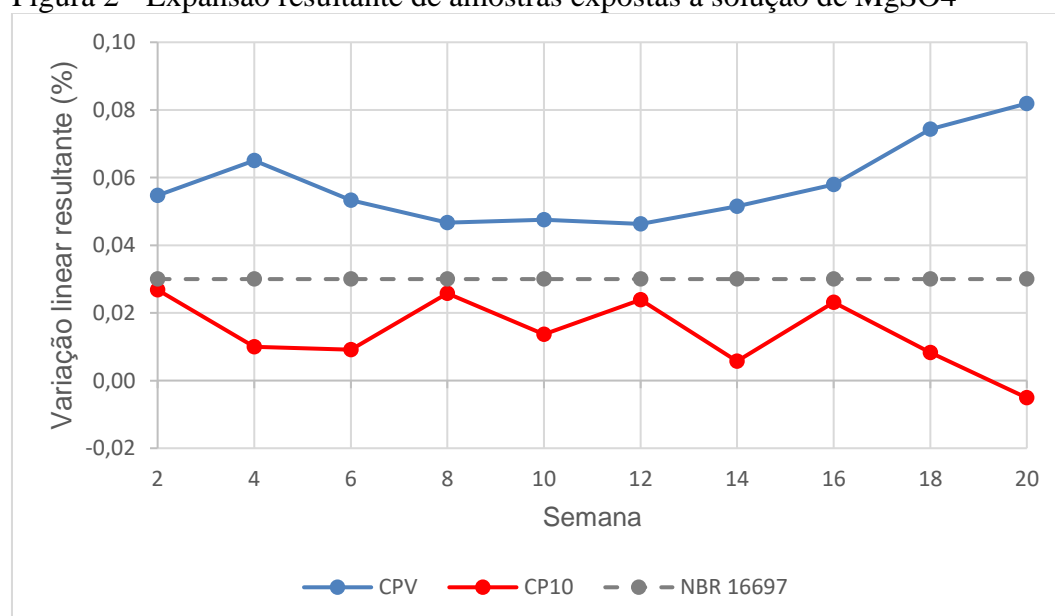
Por determinação da norma NBR 16697 (2018), um cimento é considerado resistente à sulfatos quando apresentar uma expansão linear inferior a 0,03% após 8 semanas (56 dias) de ensaio. Desde a primeira medição (2 semanas) as amostras de referência (REF) já apresentavam expansão superior ao recomendado pela norma. Na 8ª semana a variação dimensional linear resultante foi de 0,06%, chegando a 0,186% na 16ª semana e retornando ao patamar de 0,06% na 20ª semana.

No caso da substituição do cimento Portland por sílica ativa, as amostras da mistura CP10 apresentaram variação linear resultante inferior a 0,03%, durante todo período de exposição de 20 semanas (140 dias). Constata-se um aumento na expansão no período compreendido entre a 6ª semana e a 10ª semana, a partir de onde se observa uma retração na variação da dimensão linear, atingindo o patamar de retração de -0,023% ao longo das 20 semanas de exposição ao sulfato de sódio.

No gráfico da Figura 2, são apresentados os resultados de variação dimensional linear resultante

para o período total avaliado de 20 semanas (140 dias) das misturas expostas à solução de sulfato de magnésio.

Figura 2 - Expansão resultante de amostras expostas à solução de MgSO₄



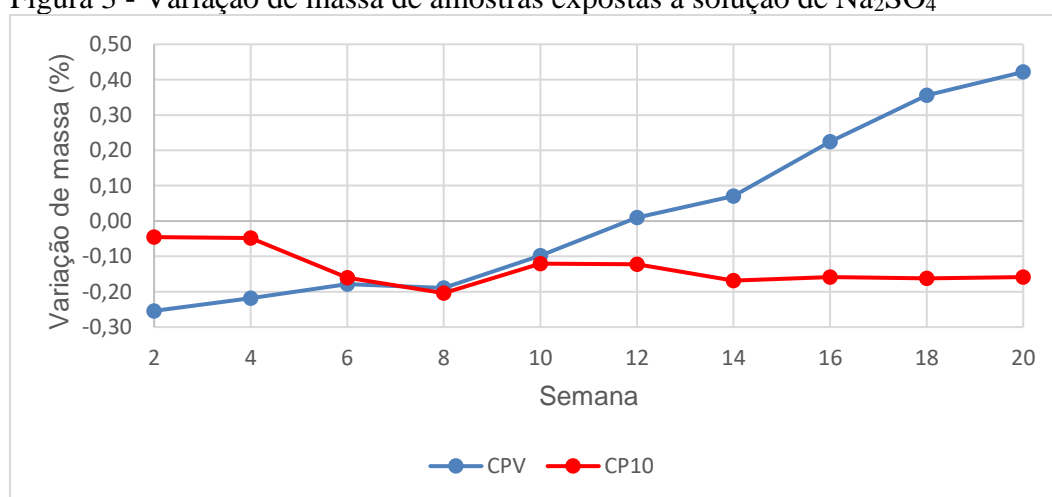
Assim como no caso do sulfato de sódio, quando a amostra de referência (REF) é exposta ao sulfato de magnésio pelo período de 20 semanas (140 dias), observa-se uma variação dimensional linear superior à 0,03%, atingindo o pico de 0,082% na 20ª semana. Já nos casos de substituição parcial por sílica ativa, a mistura CP10 apresentou variação dimensional linear inferior ao limite estabelecido pela norma NBR 16697 (2018), observando-se uma retração de -0,005% na última semana de ensaio.

Como forma de complementar o estudo da variação dimensional linear, são apresentados na Figura 3 os resultados de variação de massa das barras de argamassa do Grupo A, expostas à solução de sulfato de sódio, para o período de exposição de 20 semanas (140 dias).

A partir da análise das misturas estudadas, somente o traço CPV apresentou ganho de massa,

atingindo o patamar de 0,422% após 20 semanas de exposição ao sulfato de sódio. Este fenômeno pode estar associado à formação de produtos através da reação entre íons sulfato e fases hidratadas do cimento. Os espaços vazios então são preenchidos por esses produtos, resultando assim na densificação da amostra. Também pode ocorrer maior absorção da solução agressiva, contribuindo para o aumento na massa durante o período de exposição estudado.

Figura 3 - Variação de massa de amostras expostas à solução de Na_2SO_4

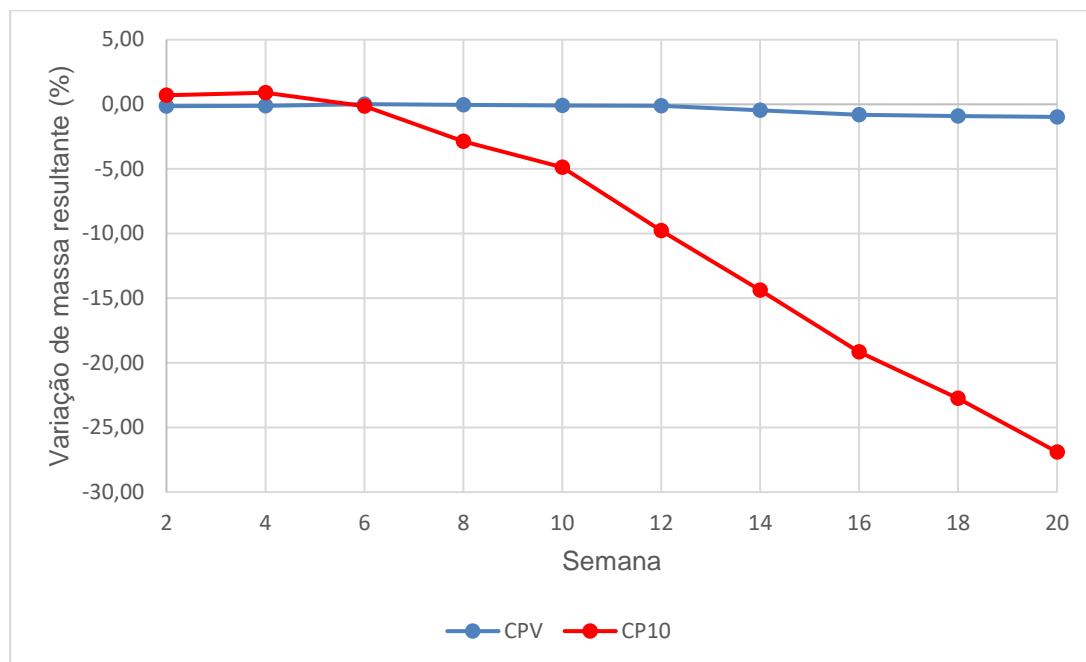


Já no caso de substituição parcial do cimento Portland tipo CPV-ARI (sem adições minerais) por sílica ativa, as amostras de CP10 apresentaram uma redução na variação de massa, atingindo o patamar de -0,159% após 20 semanas de exposição à solução agressiva de sulfato de sódio.

No gráfico da Figura 4 são apresentados os resultados de variação de massa, obtidos nas amostras do Grupo A, expostas à solução de sulfato de magnésio, durante o período de 20 semanas (140 dias).

Figura 4 - Variação de massa resultante de amostras expostas à solução de MgSO_4

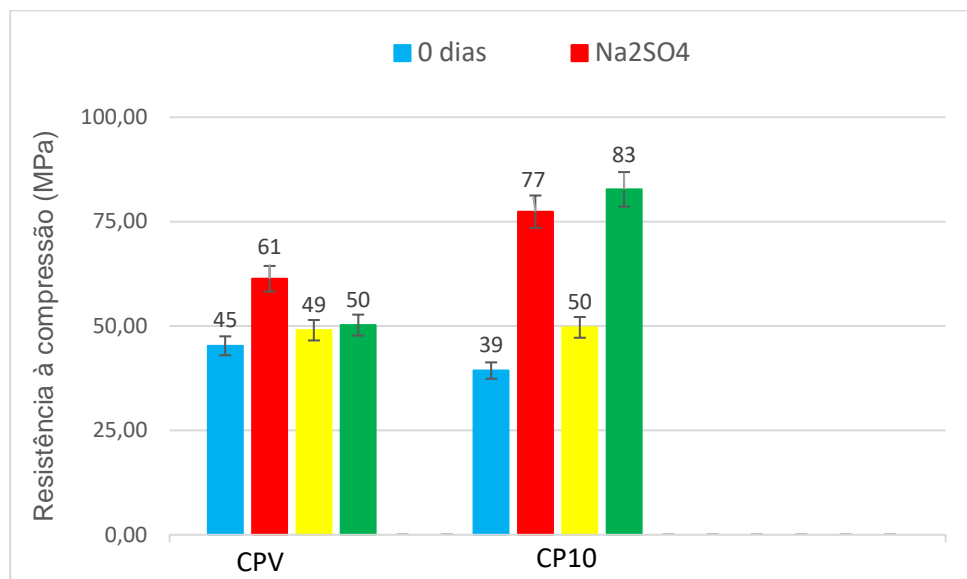
COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR SÍLICA ATIVA QUANDO EXPOSTAS AO ATAQUE POR SULFATO DE SÓDIO E MAGNÉSIO
TORRES, Felipe Nogueira; MAGALHAES, Aldo Giuntini de



Quando expostas à solução agressiva de sulfato de magnésio, somente a mistura de referência (REF) apresentou um bom comportamento, não havendo variações expressivas de massa durante todo o período estudado, atingindo o patamar de -0,973% após 20 semanas de exposição. No caso de substituição parcial do cimento Portland tipo CPV-ARI por sílica ativa, as amostras de CP10 apresentaram uma redução na massa a partir da 6ª semana, atingindo o patamar de perda de massa de -26,90% após 20 semanas de exposição ao sulfato de magnésio.

Os resultados obtidos para a resistência à compressão das amostras em argamassa pertencentes ao Grupo B são apresentados no gráfico da Figura 5. Para cada um dos traços, são expostos os resultados na idade inicial (0 dias) e após 12 semanas de exposição (84 dias) às três soluções de estudo (Na_2SO_4 , MgSO_4 e $\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Figura 5 - Resistência à compressão de argamassas antes e após a exposição de 12 semanas às soluções de Na_2SO_4 , MgSO_4 e $\text{Ca}(\text{OH})_2$



Observa-se maiores valores de resistência à compressão nas amostras da mistura CP10 em comparação as amostras de CPV, após o período de exposição de 12 semanas (84 dias), quando expostas às soluções de sulfato de sódio e hidróxido de cálcio. Tais constatações corroboram com os resultados das pesquisas realizadas por Biczók (1972) e Ouyang *et al.* (2014), nas quais as amostras expostas à solução de sulfato de sódio por 84 dias, têm sua resistência aumentada quando comparada à leitura realizada inicialmente (0 dias).

Somente no ensaio de resistência inicial (0 dias) as amostras de referência (REF) apresentaram valores superiores em relação às amostras da mistura CP10. Constata-se também que após 84 dias de exposição à solução de referência (Ca(OH)₂) os corpos de prova de CP10 apresentaram ganhos expressivos em sua resistência à compressão.

3. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o efeito da substituição parcial do cimento Portland por sílica ativa em argamassas. A substituição se mostrou eficaz em mitigar o ataque por sulfato de sódio, pois as amostras da mistura CP10 não apresentaram expansão linear resultante superior à 0,03% durante todo período ensaiado. Já no caso da solução agressiva de sulfato de magnésio, apesar de apresentar boas propriedades quanto à expansão linear, ao ser estudada sua variação de massa, foi possível identificar o grande efeito deletério desta solução.

Observou-se também que, apesar da substituição do cimento Portland por sílica ativa reduzir a resistência à compressão na idade inicial (0 dias), as amostras desta mistura obtiveram um ganho de resistência após o período de 84 dias de exposição à solução de Na_2SO_4 .

Por fim, esta pesquisa indicou que essa substituição foi benéfica apenas no caso do sulfato de sódio. Apesar dos ensaios de expansão indicarem um bom desempenho também ao sulfato de magnésio, os ensaios de perda de massa mostraram que tal mistura se mostrou inviável para ser utilizada neste meio agressivo. Os resultados obtidos indicam que os ensaios complementares mostraram-se essenciais para a correta avaliação quanto a resistência do cimento ao ataque por sulfatos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13956-1: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13583: Cimento Portland - Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

A.C.I. Committee 234, Guide for the use of silica fume in concrete (ACI 234R), ACI Mater. J. 92 (4) (1995) 437–440.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2014.

Z. Zhang, B. Zhang, P. Yan, Comparative study of effect of raw and densified silica fume in the paste, mortar and concrete, Constr. Build. Mater. 105 (2016) 82–93.