

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5369>

ARTIGO ORIGINAL

Efeito da incorporação de nanosílica e sílica ativa em argamassas frente ao ataque interno e externo de sulfatos

RESUMO: A preocupação com a durabilidade das estruturas de concreto cresce cada vez mais e, para que a vida útil das construções seja alcançada, as características do local onde a edificação será construída devem ser consideradas desde as etapas iniciais de projeto. Um dos agentes agressivos mais prejudiciais ao concreto é o íon sulfato, que pode estar presente no solo, na água do mar ou em águas subterrâneas. Este trabalho avaliou os efeitos que a incorporação de nanosílica e sílica ativa ocasionam em argamassas frente ao ataque de sulfatos de origem interna e externa. Para isso, foram desenvolvidas quatro argamassas com diferentes teores de adições e foram realizados os ensaios de variação dimensional, perda de massa e resistência à compressão. Os resultados obtidos indicam que as adições reduziram o ganho de massa dos concretos, sendo observada perda de resistência à compressão após 91 dias de ataque interno. Uma menor perda de resistência mecânica foi verificada na argamassa contendo 10% de adição de nanosílica.

Palavras-chave: ensino; interatividade; intersemiose; literatura; tecnologia.

Effect of the addition of nanosilica and silica fume on mortar attacked by internal and external sulfate

ABSTRACT: *The concern over the durability of concrete structures has increasingly grown. In order to achieve the life cycle of the buildings, the characteristics of construction site should be considered since the early design stages. One of the most aggressive agents to concrete is the sulfate ion, which may be present in soil, seawater or groundwater. This study evaluated the effects of adding nanosilica and silica fume to mortar attacked by internal and external sulfate ions. Four types of mortar, with different addition contents, were produced, and the dimensional variation, mass loss and compressive strength analyses were carried out. The results indicate that the additions considerably reduced mass gain of the concrete, with loss of compressive strength after 91*

SUBMETIDO 05/02/2021

APROVADO 23/06/2021

PUBLICADO ON-LINE 17/08/2021

PUBLICADO 30/09/2022

EDITORA ASSOCIADA

Nelma Mirian Chagas Araújo Meira

 Rosana Schmalz ^[1] *

 Raphael Klein Alves ^[2]

 Vitor Lourensato Leoni ^[3]

 Valdecir Angelo Quarcioni ^[4]

 Fernanda Giannotti da Silva
Ferreira ^[5]

[1] rosanaschmalz@gmail.com

[3] vitorleoni@gmail.com

[5] fgjannotti@ufscar.br

Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Universidade Federal
de São Carlos (UFSCar), Brasil

[2] raphael.k.alves@gmail.com

Departamento de Engenharia Civil,
Universidade Federal de São Carlos
(UFSCar), Brasil

[4] quarciva@ipt.br

Laboratório de Materiais para Produtos
de Construção (LMPC) – Habitação
e Edificações / Instituto de Pesquisas
Tecnológicas do Estado de São Paulo –
IPT, Brasil

*Autor para correspondência.

*Autor para correspondência.

days of internal attack. Lower loss of mechanical strength was observed in the mortar containing 10% nanosilica.

Keywords: *durability; mortar; nanosilica; silica fume; sulfate.*

1 Introdução

O concreto é o material construtivo mais usado do mundo, devido a características como: facilidade de moldagem de elementos de diversas geometrias, disponibilidade dos materiais constituintes e a capacidade de desenvolver altas resistências mecânicas.

A durabilidade é outra característica que vem ganhando destaque em diversos documentos internacionais, tais como o CEB-FIP Model Code 90 (CEB; FIP, 1993) e o ACI 365.1R-00 (ACI, 2000), além da incorporação de parâmetros de durabilidade em normas nacionais, como a NBR 15575 (ABNT, 2013) e a NBR 6118 (ABNT, 2014a). Durabilidade é a “capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto” (ABNT, 2014a, p. 13).

Um dos mecanismos preponderantes de deterioração relativos ao concreto é a expansão por ação de águas e solos que contenham sulfatos. O ataque por sulfatos é resultado da interação química entre os produtos de hidratação do cimento e íons sulfatos. Essa reação pode gerar fenômenos expansivos levando ao aparecimento de fissuras e, com a evolução da deterioração, a perda de massa na matriz cimentícia (HOPPE FILHO *et al.*, 2015). A ocorrência desse fenômeno pode ter origem externa, através da exposição a ambientes com altas concentrações de sulfatos, ou interna, através do uso de água e agregados contaminados com sulfato ou ainda cimento com alto teor de sulfatos em sua composição.

A concentração dos íons sulfatos na solução aquosa dos poros, a permeabilidade e a absorção de água da matriz hidratada são fatores determinantes para a ocorrência dos processos de degradação (AL-AKHRAS, 2006). Dessa maneira, a redução desses fatores pode colaborar para a mitigação dos efeitos de deterioração causados por sulfatos.

O uso de adições minerais está associado à presença de pequenas partículas que são responsáveis pelo aparecimento de pontos de nucleação para a precipitação dos produtos provenientes da hidratação do cimento, tornando o concreto menos poroso.

Uma dessas adições minerais é a nanosílica, material de dimensões nanométricas, entre 1 nm e 100 nm, ambiente onde os materiais apresentam comportamento diferente em função dos efeitos quânticos ocorridos, por conta das altíssimas superfícies e interfaces de contato (GLEIZE, 2011).

O tamanho das partículas e a possibilidade da ocorrência dos efeitos *filler* e pozolânico indicam o grande potencial da nanosílica na obtenção de concretos de grande durabilidade e elevado desempenho (SENEFF *et al.*, 2010). Por outro lado, em função do tamanho das partículas, pode ocorrer a aglutinação do material na mistura, mantendo partículas inertes.

Outra adição mineral muito utilizada é a sílica ativa, material semelhante à nanosílica, porém de granulometria maior. Inicialmente, o uso da sílica ativa foi incentivado pela busca da diminuição do uso do cimento, que é responsável por cerca de 5% das emissões de gases ácidos causadores do efeito estufa em sua produção (WBCSD, 2010). Com

a evolução dos estudos identificou-se, todavia, que seu uso era capaz de melhorar o desempenho de materiais cimentícios, tanto em relação à resistência mecânica quanto à durabilidade, pela diminuição da porosidade e da permeabilidade da matriz cimentícia.

A revisão literária realizada por Zhang *et al.* (2017), que analisaram 76 documentos sobre o assunto, mostra que o uso de nanosílica em concretos de alto desempenho é capaz de gerar grande quantidade de C-S-H (composto ligado à atribuição de propriedades cimentantes ao concreto), contribuindo para a diminuição da porosidade na pasta e na interface pasta-agregado e para o melhor desempenho frente à permeabilidade por cloretos e à resistência à compressão, à flexão e à abrasão.

Reddy e Meena (2017) e Zhang *et al.* (2017) ressaltam que a adição de nanosílica melhora a durabilidade e as propriedades mecânicas do concreto. Ressaltam também a necessidade de mais estudos na área quando se trata de durabilidade, especialmente quanto à resistência a ataques ácidos e por sulfatos.

Dessa maneira, o objetivo deste estudo é avaliar o efeito do ataque por sulfatos de origem externa e interna em argamassas que contenham nanosílica e sílica ativa em sua composição, colaborando para o conhecimento sobre a influência dessas adições na obtenção de materiais cimentícios mais duráveis.

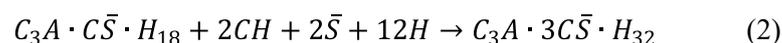
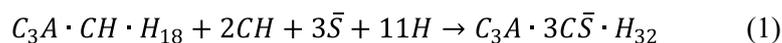
Descreve-se a seguir o mecanismo de deterioração pelo ataque de sulfatos de origem interna e externa, bem como os efeitos da utilização da sílica e da nanosílica em compósitos cimentícios.

2 Referencial teórico

Nesta seção, um referencial teórico básico é apresentado, relacionado ao problema aqui abordado.

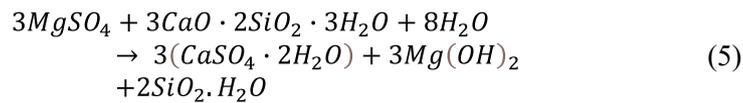
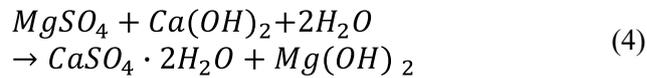
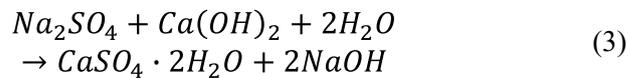
2.1 Ataque por sulfatos

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), o hidróxido de cálcio e as fases que contêm alumina presentes no cimento hidratado são mais suscetíveis ao ataque por íons sulfatos. Os cimentos Portland com mais de 5% de C_3A potencial possuirão a maior parte de alumina na forma de monossulfato hidratado ($C_3A \cdot C\bar{S} \cdot H_{18}$). Já os cimentos com teor de C_3A maior que 8% também conterão $C_3A \cdot CH \cdot H_{18}$ nos produtos de hidratação. Quando a pasta de cimento entra em contato com íons sulfatos, por causa da presença de hidróxido de cálcio, os dois hidratos que contêm alumina são convertidos para a sua forma altamente sulfatada, a etringita ($C_3A \cdot 3C\bar{S} \cdot H_{32}$). As Equações 1 e 2 indicam as reações químicas dessa transformação.



Além da formação de etringita pelo ataque de sulfatos, podem ocorrer reações de troca catiônica que levam à formação de gipsita $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, o que também pode causar expansão. A degradação da pasta de cimento Portland pela formação de gipsita ocorre pela redução do pH do sistema, com perda de rigidez e resistência; após isso, a expansão e fissuração acontecem e, por fim, o concreto se torna uma massa pastosa ou

pouco coesiva. Nas Equações 3, 4 e 5, pode-se ver a formação de gipsita pelo ataque por sulfatos, através do hidróxido de cálcio ou C-S-H presentes na pasta de cimento, dependendo do tipo de cátion associado à solução de sulfato (Na^+, K^+ ou Mg^{2+}).



2.1.1 Ataque por sulfatos de origem interna

O ataque por sulfatos de origem interna está associado à contaminação da água, do cimento ou dos agregados utilizados na confecção dos materiais cimentícios. Uma característica desse fenômeno é o aparecimento da etringita tardia (Figura 1a), ou seja, a formação de etringita por um processo que se inicia após o endurecimento do concreto e em que nenhum sulfato é proveniente do meio externo (TAYLOR; FAMY; SCRIVENER, 2001).

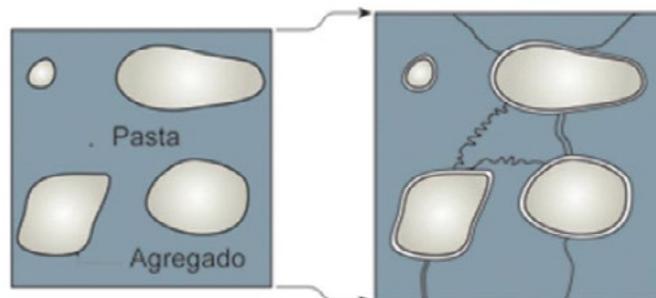
O sulfato presente nos poros da matriz é capaz de reagir com os compostos da hidratação do cimento e provocar o aparecimento de etringita e gipsita. A formação desses compostos gera um aumento de volume na mistura e, a partir do momento em que os poros não são mais capazes de acomodar as novas demandas, ocorre o aparecimento de fissuras, como ilustrado na Figura 1a.

Figura 1 ▶

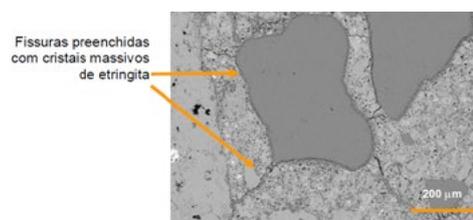
Presença de etringita tardia.

- (a) Degradação devido à formação de etringita tardia.
(b) Fissuras preenchidas com cristais de etringita

Fonte: adaptado de: (a) Taylor, Famy e Scrivener (2001) e (b) Thomas et al. (2008)



(a)



(b)

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), o teor máximo de sulfatos solúveis admissível nos agregados é de 0,1%. É importante considerar, entretanto, que agregados que excedam esse valor podem ser usados na confecção de concretos, se o teor total na mistura final

não ultrapassar 0,2%. Quanto à água de amassamento, o teor de sulfato máximo permitido é de 2000 mg/L, conforme a NBR 15900 (ABNT, 2019b).

Além da quantidade de sulfatos, a elevação da temperatura também influencia no ataque por esse elemento. Zhang, Olek e Diamond (2002) estudaram a expansão e a variação de massa de argamassas produzidas com seis tipos de cimento, com diferentes teores de sulfato (de 2,8% a 4,0%) e em três condições de exposição de temperatura (23 °C, 55 °C e 85 °C). Monitoraram a expansão das argamassas (traço unitário 1:2,5:a/c = 0,44) por 900 dias. Uma expansão considerável foi observada somente na argamassa contendo maior teor de sulfatos e após 250 dias de exposição à temperatura de 85 °C. Destacaram ainda que a mesma argamassa apresentou o maior ganho de massa (acima de 5%). No estudo, foi observada a formação da etringita tardia (DEF – *Delayed Etringite Formation*).

De acordo com Taylor, Famy e Scrivener (2001), a formação da etringita tardia é definida como a formação da etringita no material cimentício por um processo que se inicia após seu completo endurecimento, com a particularidade de os sulfatos não serem de origem externa. Em estudos desenvolvidos pelos pesquisadores, foi observada sua ocorrência em concretos que foram submetidos a altas temperaturas (acima de 70 °C).

2.1.2 Ataque por sulfatos de origem externa

De acordo com Neville (2015), os sais com sulfato em sua composição não atacam o concreto na sua forma sólida. Isso só ocorre quando estes sais estão dissolvidos em água e essa água entra em contato com a pasta de cimento hidratado.

Isaia (2011) explica que o ataque por sulfatos se caracteriza pela reação química do íon sulfato com os compostos de aluminatos do cimento endurecido. Essa reação leva à formação de produtos expansivos e conseqüente fissuração irregular do concreto, o que facilita ainda mais a penetração de soluções de sulfatos adicionais, culminando na completa desintegração do elemento. Ainda é explicado pelo autor que as possíveis causas dessa expansão são a pressão exercida pelo crescimento dos cristais de etringita e sua expansão, devido à adsorção de água em meio alcalino pela etringita.

O ataque por sulfatos não causa somente a desagregação do concreto por expansão e fissuração, mas gera também uma perda de resistência mecânica do concreto, causada pela perda de coesão na pasta de cimento e pela perda de aderência entre a pasta e as partículas de agregado (NEVILLE, 2015). Por isso, Mehta e Monteiro (2014) evidenciam duas conseqüências de um ataque por sulfatos: i) expansão do concreto, causando fissuração e aumento de sua permeabilidade com maior facilidade para a penetração de águas agressivas; ii) a queda progressiva de resistência mecânica simultânea à perda de massa, devido à perda da coesão dos produtos de hidratação.

Segundo Neville (2015), o concreto que foi atacado por sulfatos tem como característica uma aparência esbranquiçada. A deterioração do material normalmente começa nas arestas e nos cantos, com posterior fissuração progressiva e lascamento, processos que acabam reduzindo o concreto a uma condição friável ou mesmo mole.

A intensidade do ataque depende do tipo de sulfato que está dissolvido na água – o sulfato de cálcio (CaSO_4), o sulfato de sódio (Na_2SO_4), o sulfato de magnésio (MgSO_4) e o sulfato de amônia (NH_4SO_4) são os que mais agredem o concreto – e podem ser encontrados no solo, no mar, em lençóis freáticos e até mesmo no ar (COSTA, 2004).

Além da ação deletéria ao concreto em meios contendo sulfatos, as fissuras resultantes da expansão do concreto permitem que os agentes agressivos entrem com mais facilidade no material, o que acelera ainda mais o processo de deterioração generalizado.

2.2 Nanosílica e sílica ativa

Atualmente, a adição de materiais não convencionais ao concreto permite melhorar algumas propriedades, em função da alteração da microestrutura da matriz cimentícia. A nanosílica e a sílica ativa são exemplos desses materiais. Ambos possuem partículas extremamente finas que ocupam os espaços vazios entre as partículas do cimento.

A sílica ativa, muito utilizada nos dias de hoje, é uma pozolana oriunda da produção de ligas de ferrosilício e de silício metálico em fornos elétricos de redução, onde ocorre a formação de pequenas partículas de sílica amorfa, as quais apresentam diâmetros menores que 1 μm . A NBR 13956-1 (ABNT, 2012) divide a sílica ativa em não densificada, densificada e na forma de dispersão aquosa. A sílica ativa não densificada não é submetida a beneficiamento por aglomeração das partículas e apresenta densidade aparente, no estado solto, entre 150 kg/m^3 a 350 kg/m^3 . A sílica ativa densificada é submetida a beneficiamento por aglomeração das partículas, apresentando densidade aparente, no estado solto, entre 350 kg/m^3 a 700 kg/m^3 . Já a sílica ativa na forma de dispersão aquosa normalmente apresenta um teor de sólidos de 50% em massa.

A sílica ativa vem se difundindo como um dos principais componentes para a produção de pastas, argamassas ou concretos com cimento Portland de alta qualidade. Segundo Neville (2015), quando, porém, se substitui parte do cimento por sílica ativa com maior área de superfície, deve ocorrer um aumento na relação água/cimento para que a pasta tenha as mesmas propriedades reológicas e de trabalhabilidade se comparada com uma pasta de cimento sem sílica ativa. Com isso, Li *et al.* (2017) complementam que os concretos com sílica ativa necessitam de aditivos superplastificantes para manter a mesma consistência dos concretos sem adições e a mesma relação água/cimento.

A incorporação de sílica ativa promove uma diminuição da porosidade e torna a microestrutura do concreto mais densa e compacta, resultando em um material com desempenho superior ao concreto convencional, com maior resistência mecânica, resistência ao ataque de sulfatos, logo maior durabilidade.

Assim como a sílica ativa, a utilização de nanosílica vem sendo bastante estudada. As nanopartículas desse tipo de material mostram grande área de superfície, quando comparadas com materiais tradicionais, e tamanho compreendido entre 1 nm e 100 nm (REDDY; MEENA, 2017), sendo que a sílica ativa possui partículas cuja dimensão média é de 100 nm (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com Gleize (2011), a nanociência e a nanotecnologia exploram as propriedades e os fenômenos que ocorrem em uma escala na qual a matéria apresenta um comportamento especial, devido aos efeitos quânticos que prevalecem até 10 nm e na qual predominam os efeitos das altíssimas superfícies e interfaces. O refino da estrutura dos materiais ou a incorporação de nanopartículas permitem o aumento das superfícies de contato e a reatividade, o que gera várias vantagens em termos de reforço e eficiência.

Ao ser adicionada ao concreto, a sílica ativa e a nanosílica atuam de duas formas. A primeira diz respeito à reação pozolânica: quando na presença de água, ambas reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio (liberado pela hidratação do cimento) e formam silicatos estáveis que possuem propriedades cimentícias, maior fator responsável pelo aumento da resistência mecânica da pasta. Já a segunda se refere ao efeito físico, também conhecido por efeito *filler*, que acontece pelo reduzido tamanho das partículas, proporcionando um refinamento da estrutura de poros.

O efeito pozolânico, associado ao efeito *filler*, propicia uma melhora na microestrutura dos materiais à base de cimento, diminuindo a porosidade e a permeabilidade, densificando

a pasta de cimento e melhorando as características da zona de transição pasta-agregado, o que aumenta o desempenho dos concretos e argamassas.

De acordo com estudos recentes, pode-se verificar que a adição combinada de sílica ativa com nanosílica tem efeitos sinérgicos muito significativos na resistência mecânica e microestrutura das argamassas. O uso da nanosílica pode ser, portanto, realizado juntamente com a sílica ativa, para que esses efeitos sinérgicos possam ser explorados e uma máxima performance desses materiais seja alcançada (LI *et al.*, 2017).

Ressalta-se que a quantidade em excesso de qualquer adição mineral comporta-se como material inerte na pasta, argamassa ou concreto, pois, a partir de uma quantidade limite de aglomerante, a sílica e a nanosílica não participam das reações químicas.

Destaca-se ainda o aspecto ambiental na utilização de subprodutos industriais em substituição ao cimento, em que há redução das emissões de CO₂ para o meio ambiente e do gasto energético durante a produção de cimento, além de preservar os recursos naturais.

3 Materiais e métodos

Os seguintes materiais foram utilizados no preparo das argamassas: cimento Portland, nanosílica, sílica ativa, agregado miúdo natural, aditivo superplastificante (SP) e sulfato de sódio.

O cimento utilizado foi o de alta resistência inicial CPV ARI, e os resultados da caracterização física e química, realizados no Laboratório de Materiais para Produtos de Construção do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 ►
Características químicas e físicas do CPV ARI.
Fonte: dados da pesquisa

Análise química (%)	Propriedades físicas	Resultados
SiO ₂	Massa específica (g/cm ³)	3,12
Al ₂ O ₃	Início de pega (min)	135
Fe ₂ O ₃	Fim de pega (min)	210
CaO	Pasta de consistência normal (%)	31,5
MgO	Finura	Retido #200 (%)
Na ₂ O		Blaine (m ² /kg)
K ₂ O		1 dia
SO ₃	Resistência à compressão (MPa)	3 dias
RI		7 dias
PF		28 dias

Os resultados indicam que o material está em conformidade com as recomendações da NBR 16697 (ABNT, 2018b).

O agregado miúdo utilizado foi uma composição de areia fina (50%) e areia média (50%), com 2,64 g/cm³ e 2,60 g/cm³ de massa específica, respectivamente, proporção esta obtida a partir da máxima massa unitária, de acordo com a NBR 16972 (ABNT, 2021). A distribuição granulométrica da composição, obtida com base na NBR 17054 (ABNT, 2022), apresentou curva dentro zona utilizável, com módulo de finura e diâmetro máximo característico iguais a 1,82 mm e 2,4 mm, respectivamente.

Utilizou-se uma solução aquosa de sílica coloidal (nanosílica), cuja massa específica indicada pelo fabricante é igual a 1,40 g/cm³. A solução é composta de 50% de sílica e

50% de água, e o teor máximo recomendado pelo fabricante é de 10% em substituição aos aglomerantes (cimento e sílica ativa), em massa. Além da nanosílica, utilizou-se a sílica ativa, com massa específica igual a 2,10 g/cm³ e superfície específica igual a 20.000 m²/kg, valores estes também indicados pelo fabricante.

O aditivo superplastificante à base de éter policarboxílico, MasterGlenium® Sky 150, com massa específica fornecida pelo fabricante de aproximadamente 1,07 g/cm³, foi utilizado nas misturas, a fim de manter sua trabalhabilidade nas argamassas submetidas ao ensaio de variação dimensional, de perda de massa e de resistência à compressão simples.

O sulfato de sódio utilizado apresenta teor mínimo de pureza de 99,0%, conforme especificações do fabricante.

3.1 Definição dos traços

Para o preparo das argamassas, estabeleceu-se um traço de cimento:agregado miúdo de 1:3,2 e relação água/aglomerante igual a 0,50. A sílica ativa foi adicionada no teor de 10%, em substituição volumétrica ao cimento e à nanosílica, nos teores de 1%, 5% e 10%, em substituição em massa aos aglomerantes.

Destaca-se que, ao usar a nanosílica, apenas a porcentagem de sílica foi considerada, ou seja, 50%. Além disso, a massa de água presente na solução foi descontada da massa de água total.

A consistência das misturas foi fixada em (230 ± 10) mm, com o objetivo de proporcionar uma mistura e compactação adequadas para a moldagem dos corpos de prova. Com a verificação da consistência, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016), os teores de superplastificante foram definidos para cada mistura.

As argamassas preparadas foram identificadas por uma nomenclatura do tipo X-Y, onde X é o teor de nanosílica (%) e Y é o teor de sílica ativa (%). As argamassas sem adições (referência) foram identificadas por REF. O sufixo -S na nomenclatura dos traços indica que a matriz cimentícia foi contaminada com sulfato de sódio.

Na Tabela 2, estão apresentadas as composições das argamassas, sendo verificado que a sílica ativa foi utilizada somente nas misturas contendo 1% de nanosílica. A consistência das argamassas variou de 228 mm a 244 mm.

Tabela 2 ▶

Traço unitário das argamassas

Fonte: dados da pesquisa

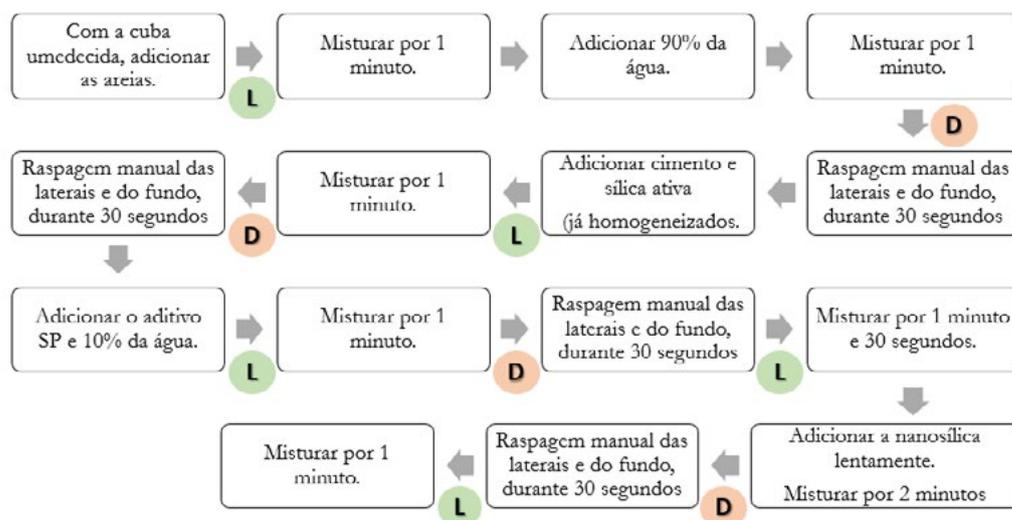
Argamassas	Traço unitário							
	C	S	N	AF	AM	Água	SP	Na ₂ SO ₄
REF-S	1	-	-	1,60	1,60	0,50	0,002	0,015
1-10-S	1	0,0756	0,011	1,80	1,80	0,53	0,009	0,016
5-0-S	1	-	0,053	1,68	1,68	0,47	0,010	0,014
10-0-S	1	-	0,111	1,78	1,78	0,44	0,022	0,013
REF	1	-	-	1,60	1,60	0,50	0,004	-
1-10	1	0,0756	0,011	1,80	1,80	0,53	0,007	-
5-0	1	-	0,053	1,68	1,68	0,47	0,010	-
10-0	1	-	0,111	1,78	1,78	0,44	0,014	-

As argamassas foram preparadas em argamassadeira de acordo com o procedimento ilustrado na Figura 2, em que “L” e “D” indicam os momentos de ligar e desligar o equipamento, respectivamente. Destaca-se, ainda, que o tempo total de mistura foi de 11 minutos.

– Procedimento de preparo das argamassas

Figura 2 ►
Procedimento de preparo das argamassas

Fonte: elaborada pelos autores



Foram moldados corpos de prova cilíndricos de ϕ 50 mm x 100 mm conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019a). Após os corpos serem desmoldados, foram submetidos à cura de 14 dias, sendo 13 dias em cura úmida e 1 dia em cura imersa em água saturada com cal. Além dos cilíndricos, moldaram-se também corpos de prova prismáticos de 25 mm x 25 mm x 285 mm, cujos procedimentos de moldagem, desmoldagem e cura foram realizados de acordo com a NBR 13583 (ABNT, 2014b).

Antes do início dos ensaios de ataque por sulfatos, todos os corpos de prova foram escovados e lavados em água corrente, para total remoção do desmoldante usado durante as moldagens.

3.2 Ataque por sulfatos

Apesar de a NBR 13583 (ABNT, 2014b) normatizar a avaliação de ataque por sulfatos, essa norma contempla apenas o estudo da variação dimensional dos corpos de prova. Dessa maneira, a perda de massa foi avaliada de acordo com a metodologia utilizada por Silva (2000) e Capraro *et al.* (2017).

O ataque de origem interna foi realizado pela contaminação da água de amassamento; o ataque de origem externa foi realizado pela imersão total dos corpos de prova em solução, logo após a cura. A concentração de sulfato de cálcio e as quantidades de corpos de prova são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 ►

Traço unitário das argamassas.

Fonte: dados da pesquisa

Ataque	Contaminação com sulfato de cálcio	Quantidade de CPs/traço/idade
Origem interna	Água de amassamento: 3%	3 CPs -REF-S
		3 CPs -1-10-S
		3 CPs -5-0-S
		3 CPs -10-0-S
Origem externa	Solução de imersão: 10%	3 CPs -REF
		3 CPs -1-10
		3 CPs -5-0
		3 CPs -10-0

O ataque de origem interna foi realizado pela contaminação da água de amassamento, com a adição de 3% de sulfato de sódio em relação à massa de água. Foram moldados 9 corpos de prova (3 para cada idade) para cada traço contaminado, ou seja, REF-S, 1-10-S,

5-0-S e 10-0-S, que foram levados à imersão em água saturada com cal, estado no qual permaneceram até as datas estipuladas para os ensaios.

Já o ataque de origem externa foi realizado pela imersão total dos corpos de prova, logo após a cura, em uma solução de água destilada contaminada com 10% de sulfato de sódio em relação à massa de água. Para isso, moldaram-se 9 corpos de prova (3 para cada idade), para cada traço sujeito ao ataque externo, ou seja, REF, 1-10, 5-0 e 10-0, que foram levados à imersão nessa solução contaminada com sulfato, situação na qual permaneceram até as datas estipuladas para os ensaios.

Para o efeito de comparação das argamassas com um traço sem adição de nanosilica e sem interação com sulfato, foram moldados 6 corpos de prova de referência não contaminados, aqui denominados como REF (água), que foram mantidos na solução saturada com cal, servindo como comparativo para ambos os tipos de ataque. Antes do início do ataque externo, ou seja, após 14 dias de cura, as argamassas REF e REF (água) permaneceram nas mesmas condições.

3.2.1 Variação dimensional

A verificação da variação dimensional das argamassas submetidas ao ataque de sulfatos foi realizada conforme a NBR 13583 (ABNT, 2014b).

Para cada traço, foram moldados 12 corpos de prova prismáticos, sendo quatro submetidos ao ataque externo, quatro ao ataque interno e quatro sem exposição ao ataque de sulfatos (referência). Como descrito na seção 3.3, os corpos de prova foram imersos em recipientes contendo diferentes soluções, os quais foram mantidos em estufa a (40 ± 2) °C durante 91 dias. Realizou-se a leitura dos comprimentos dos corpos de prova antes de se iniciarem os ataques (LI – leitura inicial) e após 14, 28, 42 e 91 dias de ataque, com auxílio de um relógio comparador.

3.2.2 Perda de massa

A verificação da perda de massa dos corpos de prova cilíndricos ocorreu aos 42 e 91 dias, após o início do ataque externo (tempo contado após os 14 dias de cura). Inicialmente, obteve-se a massa de cada corpo de prova logo após o período de cura e após cada data de ensaio; os mesmos corpos de prova foram pesados novamente. O valor final foi obtido pela média simples das massas das três amostras de cada traço, utilizadas para o ensaio.

A cada pesagem, os corpos de prova foram retirados da sua respectiva solução, lavados em água corrente e secos superficialmente com papel absorvente.

3.2.3 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018a) nos corpos de prova cilíndricos, antes do ataque externo se iniciar (após os 14 dias de cura) e também aos 42 e 91 dias após o início do ataque. Os corpos de prova ensaiados ficaram nas mesmas condições dos corpos de prova utilizados para o ensaio de perda de massa.

4 Resultados

Nesta seção, os resultados obtidos durante a realização dos experimentos são apresentados e discutidos.

4.1 Variação dimensional

Os resultados estão apresentados na Figura 3 sob a forma de expansão resultante, ou seja, a diferença entre a expansão média dos corpos de prova submetidos ao ataque (externo ou interno) e a expansão média dos corpos de prova sem ataque (acondicionados em água saturada com cal), para cada idade analisada. Na Figura 4, podem ser visualizados os corpos de prova após o término do ensaio, sem sinais de degradação.

Figura 3 ►
Variação dimensional resultante das argamassas submetidas ao ataque de sulfatos.
Fonte: dados da pesquisa

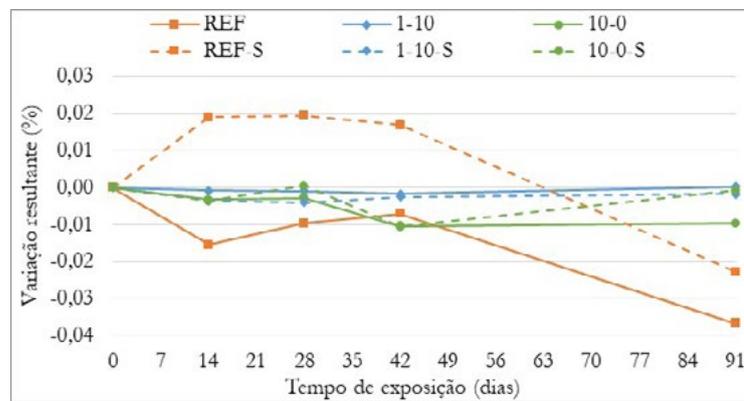
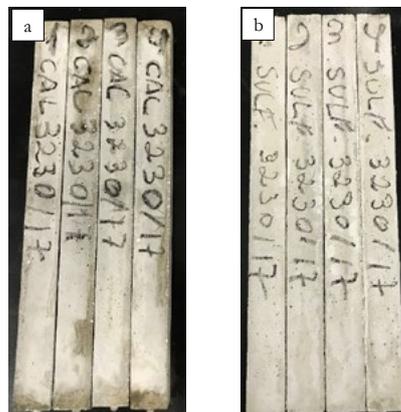


Figura 4 ►
Corpos de prova após 91 dias de ensaio: a) imersas em água com cal e b) imersas em solução de sulfato de sódio.
Fonte: arquivo dos autores



Ao longo do ensaio, pode-se notar que as argamassas com e sem adições apresentaram comportamentos distintos. As argamassas que receberam adição de nanosílica e sílica ativa (1-10 e 1-10-S) mantiveram suas dimensões praticamente inalteradas durante todo o ensaio. Já as argamassas com 10% de nanosílica atingiram -0,010% aos 42 dias, porém, após esse período, as argamassas que foram submetidas ao ataque externo (10-0) mantiveram sua expansão resultante inalterada, enquanto que as submetidas ao ataque interno (10-0-S) apresentaram uma tendência à expansão ao final dos 91 dias de ensaio.

Em relação às argamassas de referência, nota-se que o tipo de ataque levou a diferentes expansões resultantes. A argamassa REF apresentou retração de 0,015% aos

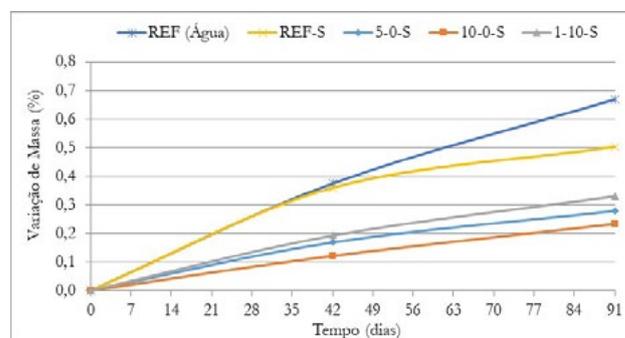
14 dias, seguida de uma tendência à redução da retração até os 42 dias; a argamassa REF-S apresentou expansão de aproximadamente 0,018% até os 42 dias. Após essa data, ambas as misturas apresentaram tendência à retração resultante, atingindo -0,037% e -0,023%, respectivamente.

Comparando os dois tipos de ataque, percebe-se que as argamassas submetidas ao ataque interno (-S) foram mais propensas à expansão do que as submetidas ao ataque externo, uma vez que o sulfato já estava presente na mistura.

4.2 Perda de massa

A evolução da variação de massa dos corpos de prova sujeitos ao ataque interno por sulfato de sódio está ilustrada na Figura 5.

Figura 5 ►
Variação de massa dos corpos de prova de argamassa. Ataque interno.
Fonte: dados da pesquisa



Durante o período de ataque, nenhuma argamassa apresentou perda de massa, ao contrário, houve aumento da massa ao longo do tempo. O comportamento apresentado pode estar relacionado à absorção de água e ao confinamento de água nos corpos de prova.

Como observado no trabalho de Schmalz (2018), as argamassas com teor de 10% de nanosílica apresentam índice de absorção menor que as argamassas com 5% e com o uso conjunto de nanosílica e sílica ativa nos teores de 1% e 10% respectivamente. Esse resultado colabora para a hipótese de que o ganho de massa se deve à absorção de água pela matriz cimentícia.

Analisando os resultados de Zhang, Olek e Diamond (2002), que avaliaram a formação de etringita em argamassas compostas com seis tipos de clínquer diferentes, é possível notar também um ganho de massa das argamassas de até 2% nos primeiros 250 dias de ensaios. Dessa maneira, é provável que os 91 dias de ataque não sejam suficientes para gerar fissurações e reações químicas de deterioração capazes de resultar em perda de massa. No estudo citado, os autores sugerem uma relação entre o aumento de massa e a expansão dos corpos de prova, com base na observação de que o aumento da massa se inicia em conjunto ao aumento de volume, embora os dois fenômenos não ocorram na mesma taxa em todos os traços avaliados. Dessa maneira, os autores atribuem o ganho de massa à ação conjunta da expansão, devido à formação de etringita e ao acúmulo de água aprisionada nos poros.

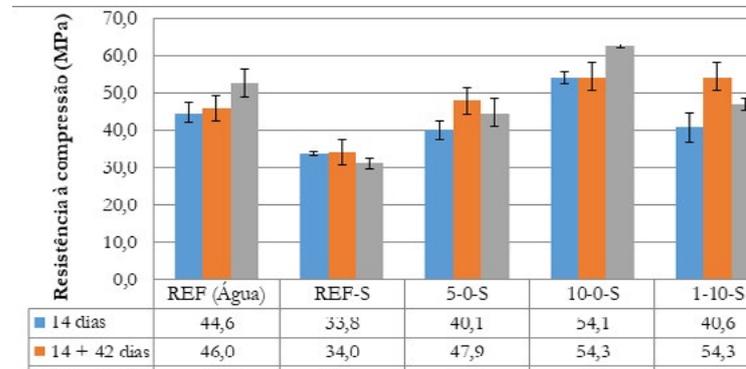
Dos traços submetidos ao ataque interno, o 10-0-S não apresentou expansão, porém houve o aumento de sua massa, o que permite relacionar a variação da massa apenas à absorção de água. Por outro lado, o traço 1-10-S apresentou expansão a partir dos 42 dias, sugerindo a possibilidade da interferência de formação da etringita. A argamassa REF-S apresentou uma expansão inicial até os 42 dias e, posteriormente, iniciou uma

retração, o que pode explicar a diferença de comportamento entre a variação de massa, a partir dos 42 dias, entre os traços REF (água) e REF-S.

A perda de massa dos corpos de prova submetidos ao ataque externo pode ser visualizada na Figura 6.

Figura 6 ►

Varição de massa dos corpos de prova de argamassa. Ataque externo.
Fonte: dados da pesquisa



Pode-se observar também que todos os corpos de prova tiveram um ganho de massa ao longo dos 91 dias de ataque, com a absorção e confinamento de água nos corpos de prova, o que mostra a necessidade de um maior tempo de ataque quando se avaliam materiais cimentícios com relação água/aglomerante igual a 0,50 e com a incorporação de adições minerais.

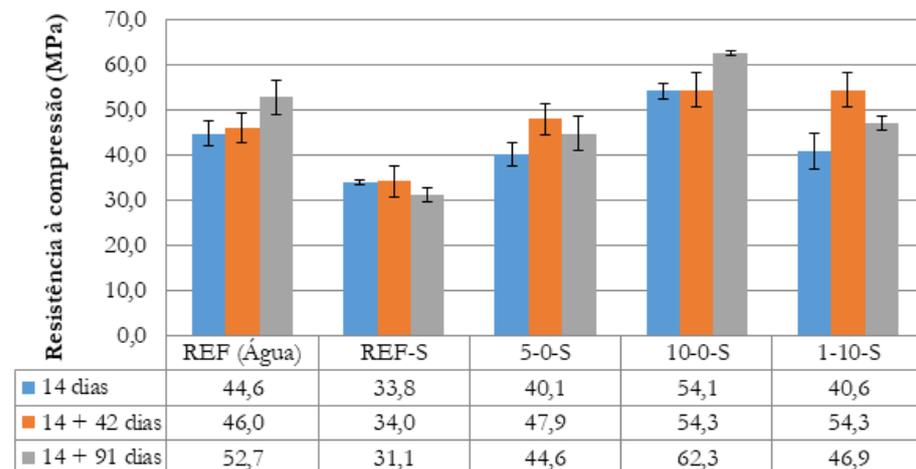
Embora os dois traços de referência tenham apresentado um maior aumento de massa, possivelmente em função da maior absorção de água ao longo do tempo, os valores foram baixos: aumento em torno de 0,6% de massa para as argamassas de referência e valores entre 0,3% e 0,4% para as argamassas com adição.

4.3 Resistência à compressão simples

O desenvolvimento das resistências à compressão simples ao longo do tempo, para as argamassas submetidas ao ataque de origem interna, pode ser visualizado na Figura 7. Neste caso, o contaminante está presente na argamassa desde a moldagem. As resistências obtidas referem-se aos ensaios realizados após os 14 dias de cura inicial (14 dias) e após a imersão em água com cal por 42 dias (14 + 42 dias) e 91 dias (14 + 91 dias).

Figura 7 ►

Resistência à compressão das argamassas. Ataque interno.
Fonte: dados da pesquisa



Observando o desenvolvimento das resistências, nota-se que os traços REF e 10-0-S manifestam comportamentos semelhantes: baixa elevação da resistência à compressão entre as idades 0 e 42 dias, seguido de mais uma elevação entre as idades 42 e 91 dias. Sendo que, até 42 dias, o ganho de resistência da argamassa REF foi de 3,1% e a da argamassa 10-0-S foi de 0,5%; já de 42 a 91 dias, o ganho foi de 23,1% e 14,7%, respectivamente. Considerando que a argamassa REF não está contaminada e não foi submetida à solução de sulfato de sódio e, portanto, não sofreu o efeito do ataque por sulfato, essa semelhança entre os resultados indica que a argamassa 10-0-S não foi afetada de maneira perceptível no ensaio.

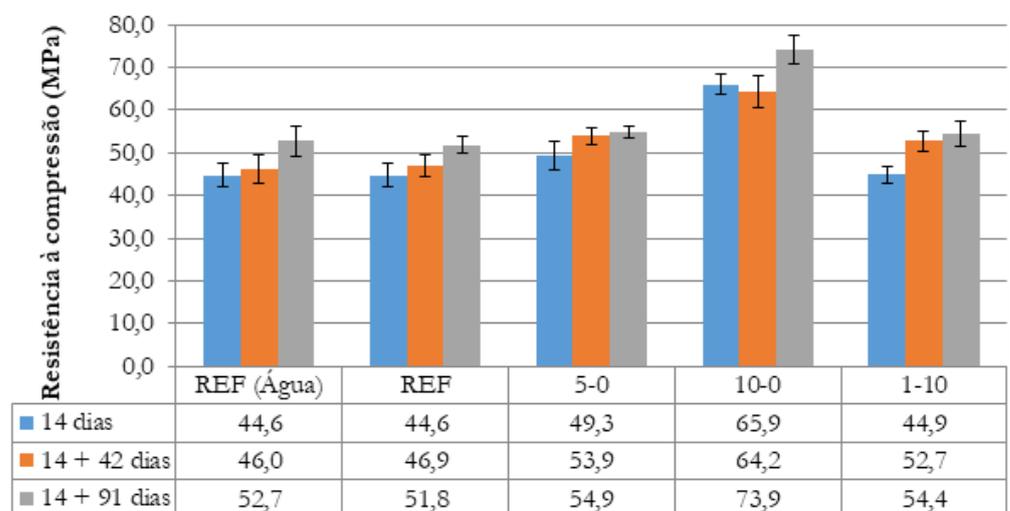
Considerando o desvio padrão das argamassas, observa-se que o traço 5-0-S não apresenta variação significativa durante o tempo de ensaio analisado. As argamassas REF-S e 1-10-S também apresentaram comportamento semelhante entre si: elevação da resistência à compressão entre as idades 0 e 42 dias e perda de resistência entre as idades 42 e 91 dias. Sendo o aumento de 0,1% da argamassa REF-S e de 1,34% da argamassa 1-10-S até os 42 dias e perda de 9,4% para a argamassa REF-S e de 15,7% para a argamassa 1-10-S entre 42 e 91 dias.

No estudo de Pereira (2015), que também analisou o efeito do ataque interno por sulfatos de sódio, é possível observar ganho inicial de resistência mecânica, seguido posteriormente por uma perda de resistência, de forma análoga ao ocorrido nas argamassas REF-S, 5-0-S e 1-10-S. Os concretos analisados apresentaram, porém, queda de resistência apenas após os 240 dias de ataque; já as argamassas aqui avaliadas apresentam tal comportamento após 42 dias de ataque.

Por outro lado, Saleh (2017) verificou que as amostras analisadas apresentaram um contínuo ganho de resistência durante os 360 dias de ensaio, observando apenas uma diminuição do desenvolvimento das taxas de resistência, quando há diminuição da relação água/cimento. Para a relação água/cimento de 0,55, a maior taxa de desenvolvimento foi de 32,3% e, para relação água/cimento de 0,31, a maior taxa de desenvolvimento foi de 25,3%, ao longo dos 360 dias.

Na Figura 8, são apresentados os valores de resistência à compressão das argamassas submetidas ao ataque externo. Ressalta-se que o traço REF (água) não possui adições e foi imerso em solução de água com cal, portanto não foi submetido a nenhum tipo de ataque.

Figura 8 ►
Resistência à compressão das argamassas. Ataque externo.
Fonte: dados da pesquisa



Pode-se observar que a argamassa com adição de 10% de nanosílica (10-0) foi a que obteve os maiores valores de resistência à compressão, comprovando o que vários autores afirmam, ou seja, que a nanosílica melhora a microestrutura do material e

melhora também as características da zona de transição pasta-agregado, aumentando o desempenho da argamassa.

Os outros traços tiveram resistência crescente ao longo do tempo, mantendo-se entre 40 MPa e 60 MPa, sendo que os traços de referência demoraram um pouco mais para ganhar resistência até os 91 dias, enquanto que os traços com nanosílica (5-0 e 1-10) tiveram um aumento na resistência até os 42 dias, passando os 50 MPa e sem grandes ganhos até os 91 dias. Tal resultado mostra que a adição da nanosílica nessas argamassas ocasionou uma maior resistência inicial.

5 Conclusões

Após todos os ensaios realizados e os resultados discutidos, pode-se concluir que:

- As argamassas expostas ao ataque externo praticamente mantiveram sua variação dimensional resultante inalterada, enquanto que as submetidas ao ataque interno apresentaram uma tendência à expansão aos 91 dias. O fato de o sulfato já estar presente na água de amassamento no ataque interno explica essa tendência de expansão, já que os íons de sulfatos não precisam ingressar do meio para o corpo de prova;
- Todos os corpos de prova apresentaram ganho de massa associado à absorção e confinamento de água em seus poros. Os traços de referência sem nenhuma adição apresentaram os maiores ganhos de massa, o que pode ser explicado pela maior absorção de água, já que esses traços possuem uma maior permeabilidade;
- A adição de 10% de nanosílica evitou perda de resistência à compressão aos 91 dias no ataque interno, enquanto que a adição de 10% de sílica ativa ou de 5% de nanosílica geraram perda de resistência entre as idades de 42 e 91 dias;
- Nenhuma ação de perda de resistência foi observada nas argamassas expostas ao ataque externo, o que demonstra mais uma vez que não houve tempo suficiente para os íons sulfatos ingressarem na matriz cimentícia;
- A adição de 10% de nanosílica levou aos maiores valores de resistência à compressão. Esses resultados mostram que a maior área superficial da nanosílica potencializa os efeitos *filler* e pozolânico dessa adição, em comparação com a sílica ativa.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv) da UFSCar e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro concedido.

À Holcim do Brasil S/A, AkzoNobel Brasil, Dow Corning Silício do Brasil e BASF S/A, pela doação dos materiais utilizados; ao grupo de pesquisa GESEC; ao Laboratório de Sistemas Estruturais (UFSCar), Laboratório de Estruturas (USP) e ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), pelo apoio na realização dos ensaios.

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro: ABNT, 2014a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019a.

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 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: ABNT, 2014b.

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575:** Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15900:** Água para amassamento do concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2019b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 365 Service-life prediction:** State-of-the-art report. Reported by ACI Committee 365. ACI 365.1R-00. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute, 2000. Disponível em: http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/3651r_00.pdf. Acesso em: 29 ago. 2022.

AL-AKHRAS, N. M. Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 9, p. 1727-1724, Sept. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.026>.

CAPRARO, A. P. B.; MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE FILHO, J.; BRANGANÇA, M. P.; PORTELLA, K. F.; OLIVEIRA, I. C. Reação Sulfática Interna (RSI) como degradação de matriz cimentícia: comportamento de pastas dosadas com diferentes teores de contaminação por sulfato. **Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción – ALCONPAT**, v. 7, n. 2, p. 119-134, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v7i2.142>.

CEB – COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON (CEB); FIP – FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAINTE. **CEB-FIP Model Code 1990**. Design Code. Lausanne: CEB, p. 437, 1993.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/PASA-89RGTR>. Acesso em: 18 abr. 2022.

GLEIZE, P. J. P. Nanociência e nanotecnologia dos materiais cimentícios. *In*: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. v. 1 e 2. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2011. ISBN 978-85-98576-20-6. v. 2, p. 1871-1884.

HOPPE FILHO, J. H.; SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; PORTELLA, K. F. Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 168-177, abr./jun. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581905>.

ISAIA, G. C. A Água no concreto. *In*: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 1 e 2. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2011. ISBN 978-85-98576-16-9. v. 1, p. 311-346.

LI, L. G.; HUANG, Z. H.; ZHU, J.; KWAN, A. K. H.; CHEN, H. Y. Synergistic effects of micro-silica and nano-silica on strength and microstructure of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 229-238, June 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.115>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2014. ISBN 978-85-98576-21-3.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015. ISBN 978-85-8260-071-9.

PEREIRA, E. **Investigação e monitoramento do ataque por sulfatos de origem interna em concretos nas primeiras idades**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/41336>. Acesso em: 18 abr. 2022.

REDDY, A. N.; MEENA, T. A comprehensive overview on performance of nano silica concrete. **International Journal of Pharmacy & Technology**, v. 9, n. 1, p. 5518-5529, May 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/316166205_A_COMPREHENSIVE_OVERVIEW_ON_PERFORMANCE_OF_NANO_SILICA_CONCRETE. Acesso em: 29 ago. 2022.

SALEH, I. S. Effect of external and internal sulphate on compressive strength of concrete. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 12, n. 20, p. 10324-10333, 2017. Disponível em: https://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n20_154.pdf. Acesso em: 18 abr. 2022.

SCHMALZ, R. **Durabilidade de argamassas submetidas ao ataque de sulfatos: efeito da adição da nanosílica**. 2015. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/9675>. Acesso em: 18 abr. 2022.

SENF, L.; HOTZA, D.; REPETTE, W. L.; FERREIRA, V. M.; LABRINCA, J. A. Effect of nanosilica and microsilica on microstructure and hardened properties of cement pastes and mortars. **Advances in Applied Ceramics**, v. 109, n. 2, p. 104-110, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1179/174367509X12502621261659>.

SILVA, I. J. **Contribuição ao estudo de concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**. 2000. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. DOI: <https://dx.doi.org/10.11606/T.88.2000.tde-20012011-100650>.

TAYLOR, H. F. W.; FAM, C.; SCRIVENER, K. L. Delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 5, p. 683-693, May 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00466-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00466-5).

THOMAS, M.; FOLLIARD, K.; DRIMALAS, T.; RAMLOCHAN, T. Diagnosing delayed ettringite formation in concrete structure. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p.841-847, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.003>.

WBCSD – WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Cement technology roadmap 2009: carbon emissions reductions up to 2050**. Paris, 2010. Disponível em: <https://cement.mineralproducts.org/documents/wbcd-ia%20cement%20roadmap%202009.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2022.

ZHANG, P.; WAN, J.; WANG, K.; LI, Q. Influence of nano-SiO₂ on properties of fresh and hardened high performance concrete: a state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 648-658, Sept. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.059>.

ZHANG, Z.; OLEK, J.; DIAMOND, S. Studies on delayed ettringite formation in early-age, heat-cured mortars: I. Expansion measurements, changes in dynamic modulus of elasticity, and weight gains. **Cement and Concrete Research**. v. 32, n. 11, p. 1729-1736, Nov. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00862-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00862-1).