

Processo analítico hierárquico (AHP) aplicado ao estudo de diferentes argamassas frente ao ataque por sulfatos

Analytic Hierarchy Process (AHP) applied to the study of different mortars against sulfate attack

Andreza Frare 

Marcella Amaral 

Diego Jesus de Souza 

Marcelo Henrique Farias de Medeiros 

Resumo

O concreto é um material suscetível a diferentes mecanismos de degradação que podem causar a formação de produtos expansivos, como o ataque externo por sulfatos. As adições minerais, como a cinza volante, o metacaulim, a sílica ativa e a sílica de casca de arroz são opções que possuem sua eficácia comprovada em argamassas e concretos expostos a ambientes com sulfatos. O presente estudo busca, por meio de um método de análise multicritérios de decisão, realizar a escolha do teor de aglomerante em argamassas (1: 3,2 a/agl=0,60) que apresentar melhor desempenho frente ao ataque externo por sulfato de sódio (Na_2SO_4) e magnésio (MgSO_4). Tendo uma base de dados pré-definida, foram escolhidos critérios e subcritérios para composição da matriz hierárquica, levando em consideração a sustentabilidade, desempenho econômico das diferentes composições e o efeito do ataque químico nas propriedades mecânicas e na durabilidade das argamassas. Ao final da análise, a composição mais indicada para ambientes agressivos contendo Na_2SO_4 foi a argamassa contendo 10% de sílica da casca de arroz em substituição parcial ao cimento Portland e, para a exposição ao MgSO_4 , a utilização de cinza volante na mesma proporção.

Palavras-chave: Ataque externo por sulfatos (AES). Materiais cimentícios suplementares. Análise hierárquica (AHP). Durabilidade.

Abstract

Concrete is a material susceptible to different degradation mechanisms that can lead to the formation of expansive products resulting from external sulfate attack (ESA). In this context, supplementary cementing materials (SCMs), like fly ash, metakaolin, silica fume, and rice husk ash, have effectively suppressed the effects caused by ESA. However, each SCM may present different behavior depending on the exposure conditions, sulfate type, SO_4^{2-} concentration, etc. Thus, this study presents a multicriteria decision-making analysis of fixed binder content for mortars (1: 3.2 a/agl=0.60) aiming to achieve the best performance against ESA (exposure to Na_2SO_4 or MgSO_4). The criteria selected for the decision-making analysis are the sustainability impact of the mixture, economic performance, and the effect of ESA on the mechanical properties and durability of the mortars. The results indicate that the most suitable composition for aggressive environments containing Na_2SO_4 was the mortar containing 10% rice husk ash and, for exposure to MgSO_4 , the use of fly ash in the same proportion.

Keywords: External attack by sulfates (EAS). Additional cementitious materials. Analytics Hierarchy Process (AHP). Durability.

¹Andreza Frare
¹Universidade Federal do Paraná
Curitiba - PR - Brasil

²Marcella Amaral
²Universidade Federal do Paraná
Curitiba - PR - Brasil

³Diego Jesus de Souza
³Technical University of Denmark
Copenhage - Dinamarca

⁴Marcelo Henrique Farias de Medeiros
⁴Universidade Federal do Paraná

Recebido em 16/01/23
Aceito em 14/11/23

Introdução

O ataque externo por sulfato (AES) é um complexo processo de degradação dos compósitos cimentícios, proveniente do ingresso dos íons sulfato (SO_4^{2-}) pela estrutura porosa através de diferentes mecanismos de transporte. Sob o ponto de vista químico, os íons sulfato reagem com as fases hidratadas do cimento (hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e fases aluminato) resultando na formação de produtos expansivos, como a etringita e a gipsita, que são responsáveis pelo surgimento de tensões internas e podem levar à do compósito cimentício (Ranjani; Ramamurthy, 2012; Whittaker; Black, 2015).

O mecanismo de deterioração dos compósitos cimentícios pelo ataque por sulfato depende de fatores como a disponibilidade de íons SO_4^{2-} , as condições de exposição (temperatura, umidade relativa) a composição da matriz cimentícia e a sua estrutura porosa (Irassar, 2009; Hoppe Filho *et al.* 2015; Souza; Medeiros; Hoppe Filho, 2018; Menéndez *et al.*, 2020). Adicionalmente, Ikumi, Cavalaro e Segura (2019) afirmam que a permeabilidade e a capacidade de tamponamento são os dois mecanismos definidos pela rede de poros que influenciam a formação dos produtos expansivos e a consequente expansão, fissuração, perda de massa e perda de resistência, contribuindo com o desempenho frente ao ataque por sulfato. Logo, um material com baixa porosidade, apresenta elevada resistência à penetração de íons sulfato e baixo potencial de precipitação de etringita em virtude do ataque.

Diversas pesquisas abordam a incorporação de diferentes materiais suplementares cimentícios na matriz cimentícia, com o intuito de diminuir a quantidade final do hidróxido de cálcio e dos compostos hidratados que contém alumina, além de promover alterações microestruturais que resultam em um refinamento dos poros e, conseqüentemente, no aumento da resistência da matriz cimentícia ao ingresso de íons sulfato (Irassar; Maio; Batic, 1996; Atahan; Dikme 2011; Siad *et al.*, 2013; Souza; Medeiros; Hoppe Filho, 2020a; 2020b; SOUZA *et al.*, 2020).

Bonakdar e Mobasher (2010) verificaram a diminuição da expansão de argamassas contendo cinza volante nos teores de 20 e 30% em substituição parcial do cimento Portland e do aparecimento de cristais expansivos de etringita após 1 ano de exposição das barras prismáticas à solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4). Segundo a investigação conduzida por Hoppe Filho *et al.* (2015), a substituição parcial do cimento Portland por cinza volante, metacaulim, sílica ativa e sílica de casca de arroz, em teores de 10% em massa, propiciaram a redução da expansão resultante em argamassas expostas a solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4) segundo a NBR 13583 (ABNT, 2014). De maneira semelhante, Souza, Medeiros e Hoppe Filho (2020a) verificaram que a substituição parcial de 10% do cimento em argamassas, por adições minerais silicosas (sílica ativa e sílica de casca de arroz) promoveram uma diminuição estatisticamente significativa na expansão após a exposição a uma solução de Na_2SO_4 por 140 dias. Porém, as mesmas adições minerais silicosas, não promoveram a mitigação da expansão quando expostas ao sulfato de magnésio (MgSO_4), sendo a expansão obtida semelhante à da série sem adições após o período de exposição do estudo (Souza; Medeiros; Hoppe Filho, 2020a).

O ataque por sulfatos não deve ser tratado de forma genérica, visto que é notável a influência do MgSO_4 nesse mecanismo de deterioração de argamassas e concretos devido às reações secundárias. A exposição ao MgSO_4 promove uma diminuição no pH da solução dos poros levando à formação cristalina da brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e uma maior redução na resistência à compressão, devido à transformação do C-S-H em M-S-H, quando comparada à exposição do mesmo material ao Na_2SO_4 , mesmo apresentando uma menor expansão (Xiong *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2020).

Comparando as duas fontes de contaminação, Sirisawat *et al.* (2014), Ortega *et al.* (2018), Souza, Medeiros e Hoppe Filho (2020a, 2020b) e Pinto *et al.* (2020) demonstraram que o material mais indicado para resistir ao ataque externo por Na_2SO_4 é diferente do mais apropriado para o ataque externo por MgSO_4 . Essa condição enfatiza a complexidade da especificação de um compósito de cimento Portland durável em uma condição de ataque por sulfatos para as obras de engenharia. Neste contexto, sistematizar a escolha do material a ser especificado em condições de ataque por sulfatos, considerando não somente aspectos químicos, é necessário e imprescindível. Isto, pois, tal escolha é mais complexa do que a simples aplicação do procedimento da NBR 13583 (ABNT, 2014), que apenas indica o potencial de durabilidade de argamassas a partir da sua expansão após a exposição ao Na_2SO_4 .

Com este preâmbulo, o presente estudo tem o foco de utilizar o processo de análise hierárquica (AHP) como ferramenta de decisão para sistematizar escolhas para os casos práticos de obras de concreto submetidas à exposição e ao ataque externo de sulfatos. Desse modo, tem-se como objetivo a escolha da composição do material cimentício que apresente maior durabilidade ao ataque por sulfatos de sódio e magnésio. Como base de dados para alimentar o processo de escolha, utilizou-se os dados do experimento desenvolvido por Souza

(2016), em que o autor investigou a durabilidade de argamassas contendo diversas adições minerais, pozolânicas ou não, expostas à solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4) e sulfato de magnésio (MgSO_4).

Análise hierárquica

A análise hierárquica (*Analytic Hierarchy Process* – AHP) é um método desenvolvido por Saaty (1991) na década de 70 e consiste na utilização do múltiplo critério como auxílio à tomada de decisão. Dolan (2008) afirma que o AHP é o método multicritério mais conhecido e utilizado, devido ao seu fundamento teórico e sua simplicidade, propiciando a tomada de decisão em circunstâncias complexas através de uma escala de comparação por pares. Além disso, o método permite a decomposição do problema em uma árvore de decisão, propiciando uma maior extração de informação da unidade especialista ou decisora, que pode ser composta por um único indivíduo ou um grupo de pessoas (Costa, 2002).

De acordo com Cheng, Li e Ho (2002), o método AHP pode ser dividido em seis etapas principais, como mostrado a seguir:

- (a) definição do problema e alternativas;
- (b) decomposição do problema em um sistema de estrutura hierárquica;
- (c) atribuição de pesos para os critérios escolhidos, através do método de comparação em pares;
- (d) verificação das medidas de consistência;
- (e) definição dos valores das alternativas em estudo; e
- (f) comparação das alternativas com o auxílio de uma matriz de decisão.

A primeira etapa consiste na definição de um objetivo conciso e claro, através do qual serão definidas possíveis soluções que podem ser adotadas para o problema, sendo avaliadas por um conjunto de critérios. Tais critérios são escolhidos na etapa seguinte, de acordo com os fatores relevantes ao desempenho das alternativas anteriormente definidas. Durante a segunda etapa, a decomposição do problema é realizada de maneira estruturada, ou seja, através de uma árvore de decisão, na qual é possível indicar a integração dos critérios e a criação de inúmeros níveis de subcritérios. Posteriormente, o decisor irá avaliar a interferência dos critérios e subcritérios no desempenho das alternativas, através da distribuição de pesos. Tal procedimento é realizado através da comparação das variáveis em pares, com o auxílio de uma escala de comparação pré-definida. A quarta etapa consiste em uma verificação matemática com o intuito de apontar possíveis inconsistências na etapa anterior, devendo ser realizada para cada nível da matriz hierárquica (Saaty, 1991; Cheng; Li; Ho, 2002; Costa, 2002; Dolan, 2008).

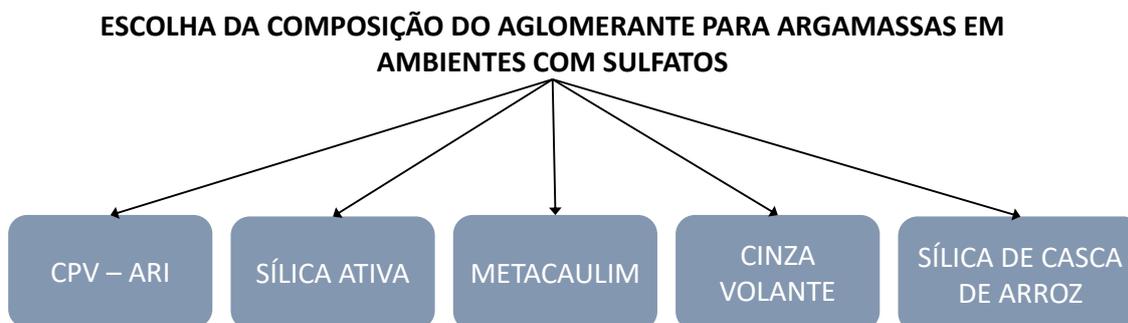
Por fim, em posse de todos os dados, o decisor irá definir uma escala de pontuação para as variáveis em relação a cada critério analisado e a comparação das alternativas será realizada através de uma matriz de decisão. Esta última etapa, por sua vez, irá considerar a importância de cada critério através dos pesos relativos definidos na terceira etapa, resultando na sua participação no desempenho final das alternativas (Costa, 2006).

Método

Definição do problema

A Figura 1 apresenta a definição do problema e das alternativas para a aplicação da AHP no presente estudo.

Figura 1 - Definição do problema e alternativas



O problema consiste na escolha da composição do aglomerante para argamassas em ambientes com sulfatos, sendo considerados os sulfatos de sódio e magnésio. As alternativas a serem avaliadas são argamassas produzidas com CPV – ARI e com a substituição parcial do cimento por adições minerais reativas, como a cinza volante, o metacaulim, a sílica ativa e a sílica de casca de arroz.

O trabalho utilizado como banco de dados no presente estudo consiste em uma dissertação de mestrado, desenvolvida por Souza (2016), cujo objetivo foi “[...] analisar o comportamento e a influência da substituição parcial do cimento Portland por adições minerais inertes e pozolânicas em mitigar a deterioração causada pelo ataque por sulfato de sódio e sulfato de magnésio em argamassas e pastas de cimento Portland, por um período de exposição de 140 dias.” (Souza, 2016, p. 26). Além da série referência, CPV-ARI, as composições contendo materiais reativos, sílica ativa, metacaulim, cinza volante e sílica de casca de arroz, também foram selecionadas para a avaliação proposta pelo presente estudo.

O programa experimental do trabalho utilizado como base de dados, consistiu no acompanhamento das reações expansivas promovidas pela exposição a soluções contendo sulfatos, através de barras prismáticas com dimensões (25x25x285) mm e na avaliação das propriedades mecânicas e físicas ao longo do tempo, com o auxílio de corpos de prova prismáticos com dimensões (40x40x160) mm. As argamassas foram produzidas seguindo o procedimento preconizado pela NBR 7215 (ABNT, 2019), com traço de 1,0:3,2 e relação água/aglomerante igual a 0,60. As adições minerais foram utilizadas como substituição parcial do cimento, em massa, no teor de 10%. A Tabela 1 mostra a proporção de mistura dos materiais utilizados para as diferentes composições.

Ao final deste procedimento as misturas foram moldadas, levadas à cura inicial em câmara úmida por 48 horas e, posteriormente, imersas em água saturada com cal durante 12 dias, totalizando 14 dias de cura. Após os dois procedimentos iniciais de cura, as amostras foram divididas em três séries e imersas em soluções distintas. Uma manteve-se em solução saturada com hidróxido de cálcio, a qual serviu como referência. Uma foi submetida à solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4) e a outra de sulfato de magnésio (MgSO_4), onde permaneceram durante 140 dias. A segunda solução seguiu o recomendado pela norma brasileira para avaliação da variação dimensional de argamassas expostas à solução de sulfato de sódio (ABNT, 2014), resultando em uma concentração de 100 g de $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{L}$ de solução. Considerando uma concentração constante de íons sulfato (SO_4^{2-}) para ambas as soluções, tem-se uma solução de sulfato de magnésio com concentração igual a 84,74g de $\text{Mg}_2\text{SO}_4/\text{L}$ de solução contaminante.

Consequente à preparação das soluções, os corpos de prova e os contaminantes foram dispostos em recipientes, respeitando uma relação entre o volume de solução e o volume de amostras igual a 4,0/1,0 e levadas à estufa, à temperatura de 40 °C durante todo o período de análise.

Ao longo do tempo foram realizados ensaios periódicos com o intuito de avaliar a deterioração promovida pela exposição às soluções contaminantes, dentre eles, a variação dimensional linear e a variação de massa, aplicadas com o intuito de avaliar a formação dos produtos expansivos pela reação com os íons sulfatos. Adicionalmente, os efeitos nas propriedades mecânicas, como a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão, foram quantificados, bem como a variação da velocidade de pulso ultrassônico. Essas alterações físicas devido ao ataque por sulfatos foram comprovadas com o uso de técnicas microestruturais por Souza (2016).

Estrutura hierárquica

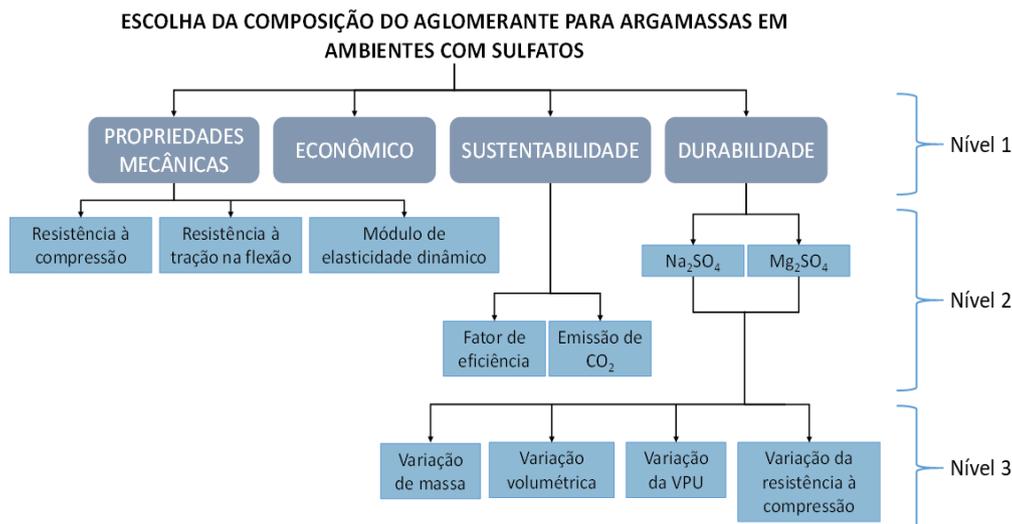
A Figura 2 apresenta a estrutura hierárquica dos critérios e subcritérios definidos para a escolha da composição do aglomerante para argamassas em ambientes com sulfatos.

Tabela 1 - Composição das argamassas para moldagem dos corpos de prova

Série	Nomenclatura	Cimento (g)	Adição (g)	Água (g)	Areia (g)	a/agl
CPV - ARI	CPV	1000	-	600	3200	0,60
Cinza Volante	CV	900	100			
Metacaulim	MT	900	100			
Sílica Ativa	SA	900	100			
Sílica de casca de arroz	SCA	900	100			

Fonte: adaptado de Souza (2016).

Figura 2 - Estrutura hierárquica dos critérios e subcritérios



O critério “Propriedades mecânicas” tem como objetivo avaliar as propriedades mecânicas das argamassas submetidas à solução de hidróxido de cálcio, ou seja da referência. Dessa maneira, são apresentados três subcritérios distintos: a resistência à compressão, a resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade dinâmico. A resistência à compressão e a resistência à tração são expressos de forma comparativa através dos dados obtidos nos ensaios realizados sem a contaminação por sulfato, ou seja, após 140 dias de cura em solução de água saturada com cal.

Os critérios “Econômico” e “Sustentabilidade” também foram avaliados de forma quantitativa. O primeiro apresenta o valor monetário necessário para a produção de 1 m³ das diferentes composições de argamassa, considerando a compra de todos os insumos, exceto a água. Em contrapartida, o segundo contém dois subcritérios distintos que visam quantificar o critério, o fator de eficiência (b_{ics}) no uso de aglomerantes e a emissão de CO₂ (c_{ics}), ambos calculados com base no indicado por Damineli *et al.* (2010) em relação a resistência à compressão das argamassas após 140 dias de cura em solução de água saturada com cal. Segundo os autores, tais parâmetros, quando utilizados em conjunto, permitem uma análise da eficiência de todo o processo de produção e utilização dos materiais cimentícios, através da incorporação de parâmetros relativos a sustentabilidade ambiental, como a eficiência do processo de produção dos cimentos, a dosagem do material cimentício e, por fim, a natureza e qualidade dos materiais utilizados.

Por fim, o critério “Durabilidade” refere-se à durabilidade das argamassas frente à exposição das soluções contaminantes, dividindo-se em subcritérios que tem como intuito avaliar a durabilidade das diferentes argamassas frente ao ataque por sulfato provenientes da contaminação por sulfato de sódio e de magnésio, sendo eles:

- (a) variação de massa;
- (b) variação volumétrica;
- (c) variação de velocidade de pulso ultrassônico (VUP); e
- (d) variação de resistência à compressão das argamassas submetidas aos sulfatos.

Todos os subcritérios foram expressos de forma quantitativa e apresentam a variação dos valores obtidos para cada ensaio ao final de 140 dias de exposição, em relação aos valores obtidos para a mesma série em cura submersa em água com cal. A variação de massa, a variação volumétrica e a variação de velocidade de pulso ultrassônico (VUP) são parâmetros que avaliam, de forma indireta, a formação dos compostos expansivos e deterioração dos compostos cimentícios provenientes do ataque por sulfato. Por outro lado, a variação de resistência à compressão avalia o efeito de tais produtos nas propriedades mecânicas das argamassas.

Determinação do peso de cada critério

Os pesos dos critérios e subcritérios foram determinados a partir do conhecimento técnico dos autores do trabalho que possuem um quadro formado por doutores e mestres em durabilidade das estruturas de concreto

e experiência no uso de EH, com o auxílio de uma escala de 5 classificações, conforme indicado por Saaty (1991) e apresentado pela E1765 (ASTM, 2016), sendo descrita nas tabelas apresentadas a seguir¹.

A Tabela 2 mostra a matriz de cálculo dos pesos relativos dos critérios que se encontram no nível 1 da estrutura hierárquica criada.

O critério “Durabilidade” apresentou o maior peso relativo, seguido dos critérios “Propriedades mecânicas”, “Econômico” e “Sustentabilidade”. Tal comportamento já era esperado, visto que a definição do problema possui caráter de análise em relação à durabilidade das argamassas frente a um determinado tipo de deterioração.

A partir da definição dos pesos relativos de cada critério constituinte da matriz hierárquica, a matriz do nível 1 foi submetida ao teste de razão de consistência (RC) indicado por Saaty (1991) e pela E1765 (ASTM, 2016) para avaliação de possíveis inconsistências no julgamento realizado pelos autores. De acordo com Saaty (1991) e a E1765 (ASTM, 2016), uma razão de menor do que 0,1 indica a consistência da matriz e dos pesos atribuídos.

Para a realização dessa análise, a matriz de comparação aos pares foi multiplicada pelo vetor dos pesos de cada critério, o valor obtido foi dividido pelo peso correspondente, a média dos resultados obtidos corresponde ao máximo autovalor da matriz de comparação ($\lambda_{\text{máx}}$). Após esse processo é possível calcular o Índice de Consistência pela equação $IC = (\lambda_{\text{máx}} - n) / (n - 1)$, onde n é o número de elementos na matriz. Por fim calcula-se a RC que é dada através da razão entre o índice de consistência (IR) e o índice randômico (IR), onde o IR é calculado a partir de uma matriz randômica recíproca com elementos não negativos, e Saaty (1991) aproximou esse índice para diferentes tamanhos de matriz N .

Considerando o índice de consistência e a ordem da matriz, os critérios do nível 1 apresentaram razão de consistência igual a 0,057, logo, os pesos adotados para julgamento constituem uma matriz consistente.

O mesmo procedimento foi aplicado aos subcritérios presentes no nível 2 e no nível 3. As Tabelas 3 a 6 apresentam, respectivamente, os pesos relativos dos subcritérios referentes as propriedades mecânicas, sustentabilidade e a durabilidade.

Em relação ao critério “Propriedades mecânicas”, o item referente à resistência à compressão apresentou maior influência relativa, sendo esta uma característica intrínseca do material. De maneira semelhante, em relação aos subcritérios de durabilidade, a variação de resistência à compressão apresentou maior peso relativo, seguido dos parâmetros referentes à formação de produtos expansivos (variação de massa e variação dimensional linear), da variação de resistência à tração na flexão e, por fim, a variação de velocidade de pulso ultrassônico (VPU). Os subcritérios de sustentabilidade apresentaram pesos relativos semelhantes, evidenciando a importância de ambos os parâmetros.

Tabela 2 - Peso relativo dos critérios do nível 1

Escala de julgamento		Propriedades mecânicas	Econômico	Sustentabilidade	Durabilidade	Total da linha	Peso relativo
X é igualmente importante que Y	1						
X é levemente mais importante que Y	3						
X é mais importante que Y	5						
X é muito mais importante que Y	7						
X é extremamente mais importante que Y	9						
E1765 (ASTM, 2016)							
Propriedades mecânicas		1	3	3	1/5	7,20	0,255
Econômico		1/3	1	1	1/5	2,53	0,090
Sustentabilidade		1/3	1	1	1/5	2,53	0,090
Durabilidade		5	5	5	1	16	0,566
Total geral						28,27	1,000

¹Tendo em vista que o processo de determinação de pesos de cada critério confere certo grau de racionalidade com base em avaliações subjetivas e técnico-pessoais, os autores colocam-se a disposição para discutir e disponibilizar dados explicando quais argumentos foram levados em consideração para determinar que um fator é igualmente, moderadamente, ou mais importante que outro, e assim garantir a reprodutibilidade e replicabilidade desse estudo a eventuais interessados.

Tabela 3 - Peso relativo dos subcritérios de propriedades mecânicas no nível 2

Escala de julgamento		Resistência à tração na flexão	Resistência à compressão	Módulo de elasticidade dinâmico	Total da linha	Peso relativo
X é igualmente importante que Y	1					
X é moderadamente importante que Y	3					
X é mais importante que Y	5					
X é muito mais importante que Y	7					
X é extremamente mais importante que Y	9					
Resistência à tração na flexão		1	1/5	1	2,20	0,143
Resistência à compressão		5	1	5	11,00	0,714
Módulo de elasticidade dinâmico		1	1/5	1	2,20	0,143
Total geral					15,40	1,000

Tabela 4 - Peso relativo dos subcritérios de sustentabilidade no nível 2

Escala de julgamento		Fator de eficiência	Emissão de CO ₂	Total da linha	Peso relativo
X é igualmente importante que Y	1				
X é moderadamente importante que Y	3				
X é mais importante que Y	5				
X é muito mais importante que Y	7				
X é extremamente mais importante que Y	9				
Fator de eficiência		1	1	2,00	0,500
Emissão de CO₂		1	1	2,00	0,500
Total geral				4,00	1,000

Tabela 5 - Peso relativo dos subcritérios de durabilidade no nível 2

Escala de julgamento		Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	Total da linha	Peso relativo
X é igualmente importante que Y	1				
X é moderadamente importante que Y	3				
X é mais importante que Y	5				
X é muito mais importante que Y	7				
X é extremamente mais importante que Y	9				
Sulfato de sódio (Na₂SO₄)		1	1	2,00	0,500
Sulfato de magnésio (MgSO₄)		1	1	2,00	0,500
Total geral				4,00	1,000

Tabela 6 - Peso relativo dos subcritérios de durabilidade no nível 3

Escala de julgamento		Variação de massa	Variação volumétrica	Variação de VPU	Variação de resistência à compressão	Total da linha	Peso relativo
X é igualmente importante que Y	1						
X é moderadamente importante que Y	3						
X é mais importante que Y	5						
X é muito mais importante que Y	7						
X é extremamente mais importante que Y	9						
Variação de massa		1	1	1/3	1/3	5,33	0,217
Variação volumétrica		1	1	3	1/3	5,33	0,217
Variação de VPU		1/3	1/3	1	1/5	1,87	0,076
Variação de resistência à compressão		3	3	5	1	12,00	0,489
Total geral						24,53	1,00

O procedimento utilizado anteriormente para análise da consistência dos pesos relativos atribuídos aos critérios de avaliação da matriz hierárquica foi repetido para os subcritérios do nível 2. Sendo os subcritérios relativos às propriedades mecânicas, a sustentabilidade e a durabilidade apresentando razão de consistência igual a 0, indicando a perfeita consistência da matriz de julgamento. Por fim, a matriz para julgamento dos pesos relativos dos subcritérios de durabilidade – nível 3 também apresentou consistência, sendo sua razão de consistência igual a 0,098.

Resultados e discussões

A partir da atribuição dos pesos para cada um dos critérios e subcritérios escolhidos para compor a matriz hierárquica do presente estudo foi realizada a definição dos valores para a avaliação das alternativas da composição do aglomerante de argamassas sujeitas ao ataque por sulfatos. Seguindo a recomendação de Saaty (1991), iniciou-se a análise pelos subcritérios. Como citado anteriormente, o critério “Propriedades mecânicas” divide-se em três subcritérios e tem como objetivo avaliar as propriedades mecânicas das argamassas após 140 dias de cura em solução de água saturada com cal.

A Tabela 7 apresenta os valores atribuídos a cada um dos subcritérios relacionados às características mecânicas das argamassas, coletados do trabalho desenvolvido por Souza (2016). Os valores inseridos consistem em dados quantitativos, dessa forma, foi realizada a normalização dos dados para a obtenção de resultados na escala de 0 a 1. Tal procedimento consiste na divisão dos valores atribuídos a cada alternativa pelo maior valor da respectiva coluna da Tabela 7, considerando um determinado subcritério.

No caso da “Resistência à compressão”, a série contendo sílica de casca de arroz (SCA) apresentou maior valor, igual a 62,50 MPa, dessa forma, os demais valores foram divididos por ele, resultando em coeficientes de normalização igual a 0,69 0,90, 0,76 e 0,96, para as alternativas CPV, CV, MT e SA, respectivamente. Por fim, os pesos relativos de cada subcritério (Tabela 3) foram aplicados aos valores normalizados de cada alternativa, por exemplo, o peso do critério de resistência à compressão, 0,714 (Tabela 3) foi multiplicado com o valor normalizado de resistência à compressão, 0,69 (Tabela 7) e por 100, resultando na nota do critério. Sendo a somatória dos valores obtidos para cada alternativa o desempenho referente ao critério “Propriedades mecânicas”.

A argamassa SCA apresentou maior desempenho em relação às propriedades mecânicas, seguida das argamassas SA, CV, MT e CPV. Diversos estudos apontam que a incorporação de adições minerais promove uma melhoria nas propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios devido a melhoria no empacotamento dos sólidos, aliado à interação com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento para a formação de silicatos de cálcio hidratado secundários (C-S-H), no caso das adições com potencial reativo (pozolânicas), resultando na densificação da matriz cimentícia (Juenger; Siddique, 2015; Singh, 2018). Cabe ressaltar ainda que a sílica ativa e a sílica de casca de arroz além de possuírem mais de 88% de SiO₂ em suas composições químicas, são classificadas como adições pozolânicas de elevada reatividade (Medeiros *et al.*, 2015). Logo, podendo apresentar uma maior produção de C-S-H secundário em idades avançadas. Deste modo, o resultado de desempenho das alternativas obtido através da matriz de decisão condiz com o esperado pelos autores.

Tabela 7 - Matriz de decisão das argamassas para os subcritérios de “Propriedades mecânicas”

COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA	VALORES ATRIBUÍDOS			VALORES NORMALIZADOS			NOTA NOS CRITÉRIOS			DESEMPENHO QUANTO ÀS PROPRIEDADES MECÂNICAS
	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)	Resistência à compressão	Resistência à tração na flexão	Módulo de elasticidade dinâmico	Resistência à compressão	Resistência à tração na flexão	Módulo de elasticidade dinâmico	
CPV	42,90	7,50	36,80	0,69	0,64	0,86	49,03	9,16	12,28	70,47
CV	56,30	10,00	42,80	0,90	0,85	1,00	64,34	12,21	14,29	90,84
MT	47,70	8,40	36,80	0,76	0,72	0,86	54,51	10,26	12,28	77,05
SA	60,00	9,70	41,00	0,96	0,83	0,96	68,57	11,84	13,68	94,10
SCA	62,50	11,70	42,00	1,00	1,00	0,98	71,43	14,29	14,02	99,73

O mesmo procedimento foi aplicado aos subcritérios referentes à sustentabilidade, como é apresentado na Tabela 8. O fator de eficiência (bi_{cs}) foi determinado através do consumo de aglomerantes para $1m^3$ de argamassa, sendo igual a $470,15 \text{ kg}/m^3$ para as composições presentes no presente estudo, e pela resistência à compressão de cada alternativa após 140 dias de cura em água saturada com cal (Tabela 7). Adicionalmente, foi realizada uma inversão de valores, visto que, o menor consumo de aglomerantes para a atribuição de 1 MPa é melhor para o compósito cimentício em relação à sua eficiência energética e ambiental. De maneira semelhante, a emissão de CO_2 (ci_{cs}) se mostra melhor em relação à sustentabilidade quanto menor é o valor obtido, tendo os seus valores invertidos na matriz de decisão. A emissão de CO_2 nas diferentes alternativas foi determinada considerando a substituição parcial de 10% do cimento pelas adições minerais, em massa, resultando em um consumo de $423,14 \text{ kg}$ de cimento por m^3 de argamassa, e a emissão de 679 kg de CO_2 por tonelada de cimento (GCCA, 2020). Não foram consideradas as emissões de CO_2 geradas pelas adições.

Após a normalização dos dados e a aplicação dos pesos relativos a cada subcritério (Tabela 4), a argamassa com sílica de casca de arroz (SCA) apresentou maior desempenho frente à sustentabilidade, seguida das composições, SA, CV, MT e CPV. É possível observar uma similaridade de comportamento do desempenho à sustentabilidade das alternativas em relação às propriedades mecânicas, visto que as argamassas apresentam mesmo teor de substituição e, tanto o fator de eficiência quanto a emissão de CO_2 , se baseiam na resistência à compressão das argamassas após 140 dias de cura em solução de água saturada com cal.

A análise dos subcritérios de durabilidade tem início no nível 3. A Tabela 9 apresenta os dados das argamassas, referente aos subcritérios adotados, após a exposição à solução de sulfato de sódio e sulfato de magnésio pelo período de 140 dias.

Tabela 8 - Matriz de decisão das argamassas para os subcritérios de “Sustentabilidade”

COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA	VALORES ATRIBUÍDOS		VALORES NORMALIZADOS		NOTA NOS SUBCRITÉRIOS		DESEMPENHO QUANTO À SUSTENTABILIDADE
	Fator de eficiência (MPa/(kg/m ³))	Emissão de CO ₂ (kg(cim.)/(kg/m ³ (CO ₂)))	Fator de eficiência	Emissão de CO ₂	Fator de eficiência	Emissão de CO ₂	
CPV	1/10,96	1/7,44	0,62	0,62	30,89	30,88	61,78
CV	1/7,52	1/5,10	0,90	0,90	45,04	45,04	90,08
MT	1/8,87	1/6,02	0,76	0,76	38,16	38,16	76,32
SA	1/7,05	1/4,79	0,96	0,96	48,00	48,00	96,00
SCA	1/6,77	1/4,60	1,00	1,00	50,00	50,00	100,00

Tabela 9 - Dados relacionados aos subcritérios de “Durabilidade”

COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA	VALORES ATRIBUÍDOS Na ₂ SO ₄				VALORES ATRIBUÍDOS MgSO ₄			
	Varição da VUP (MPa)	Varição de massa (g)	Varição volumétrica (mm)	Varição da resistência à compressão (MPa)	Varição da VUP (MPa)	Varição de massa (g)	Varição volumétrica (mm)	Varição da resistência à compressão (MPa)
CPV	-6,50	1,27	3,40	-5,00	0,50	-0,25	-3,00	-10,30
CV	-4,00	0,60	2,75	-6,50	-0,70	-0,75	-3,70	-9,00
MT	-11,00	1,10	5,30	-14,00	-1,20	-1,50	-5,70	-10,30
SA	0,00	0,10	0,00	0,00	-2,00	-3,00	-6,40	-13,00
SCA	-1,10	0,23	0,00	-1,00	-1,50	-2,50	-6,10	-16,00

Fonte: adaptado de Souza (2016).

As argamassas expostas ao sulfato de sódio (Na_2SO_4) apresentaram valores percentuais positivos de variação de massa e variação volumétrica, indicando a precipitação de produtos expansivos provenientes das reações sulfáticas e, conseqüentemente, a variação dimensional linear dos corpos de prova. Tais parâmetros são utilizados invertidos na matriz de decisão, visto que, quanto maior é a formação de produtos expansivos e a expansão da matriz cimentícia, menos durável é a composição. Entretanto, é importante evidenciar o fato de que a exposição de compósitos cimentícios às diferentes soluções de Na_2SO_4 e MgSO_4 resultam em similares, porém distintos mecanismos de deterioração das amostras. Na exposição à solução de Na_2SO_4 há uma tendência na qual o desenvolvimento de fissuras sejam originados na zona de transição do agregado com a pasta cimentícia, bem como, em poros e fissuras pré-existentes da pasta. Com o progresso do ataque por sulfato de sódio, tais fissuras tendem a crescer em comprimento e largura ao longo da matriz cimentícia da argamassa e/ou concreto. Por outro lado, a exposição ao sulfato de magnésio (MgSO_4) além de promover semelhante progresso no desenvolvimento de fissuras, há também um importante fator característico do ataque por MgSO_4 , a descalcificação das estruturas de C-S-H e decorrente formação de silicato de magnésio hidratado (M-S-H), que possui baixa capacidade de ligação e nenhuma propriedade cimentante. Resultando, conseqüentemente, em valores negativos de variação de massa e variação volumétrica devido ao desgaste superficial das argamassas. Enquanto compósitos expostos à solução de Na_2SO_4 tendem a depositar, principalmente na zona de transição do agregado com a pasta cimentícia, a exposição ao sulfato de magnésio (MgSO_4) promove a formação de fissuras na própria pasta cimentícia (Wu *et al.*, 2020), resultando em valores negativos de variação de massa e variação volumétrica, devido ao desgaste superficial das argamassas. Logo, os menores valores percentuais apresentam a maior deterioração do compósito. Há uma tendência de que quanto maior a reatividade da adição mineral e conseqüente maior consumo de portlandita, mais intenso será o desgaste superficial dos compósitos expostos ao ataque por sulfato de magnésio.

Com o intuito de realizar uma padronização dos efeitos dos dois reagentes, os valores referentes à exposição ao MgSO_4 foram utilizados em módulo na matriz de decisão, de modo que o maior valor representasse a menor durabilidade da argamassa. Cabe ressaltar que a alternativa CPV apresentou valor positivo de variação de massa, não indicando o desgaste superficial característico da longa exposição ao sulfato de magnésio, dessa maneira, o valor 0 foi atribuído ao subcritério.

O mesmo raciocínio foi aplicado aos valores de variação de VUP e variação de resistência à compressão. Dessa maneira, foram atribuídos valores em módulo a estes parâmetros, sendo posteriormente invertidos para a utilização na matriz de decisão. Apenas as alternativas SA e SCA tiveram seus valores anulados na variação de VUP e na variação de resistência à compressão, respectivamente, visto que, diferente das demais alternativas, não foi possível observar o efeito de deterioração proveniente do ataque por sulfatos nestes casos.

A Tabelas 10 e 11 apresentam, respectivamente, a normalização dos dados e a matriz de decisão para determinação do desempenho quanto à durabilidade das alternativas expostas ao Na_2SO_4 e ao MgSO_4 , considerando os pesos relativos definidos na Tabela 6.

Tabela 10 - Matriz de decisão das argamassas expostas ao sulfato de sódio (Na_2SO_4) para os subcritérios - nível 3 de "Durabilidade"

COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA	VALORES ATRIBUÍDOS				VALORES NORMALIZADOS				NOTA NOS SUBCRITÉRIOS				DESEMPENHO QUANTO AO ATAQUE POR Na_2SO_4
	Varição da VUP	Varição de massa	Varição volumétrica	Varição da resistência à compressão	Varição da VUP	Varição de massa	Varição volumétrica	Varição da resistência à compressão	Varição da VUP	Varição de massa	Varição volumétrica	Varição da resistência à compressão	
CPV	1/6	4/5	2/7	1/5	0,17	0,08	0,81	0,20	1,29	1,71	17,58	9,78	30,37
CV	1/4	1 2/3	1/3	1/6	0,28	0,17	1,00	0,15	2,09	3,62	21,74	7,53	34,98
MT	0	1	1/5	0	0,10	0,09	0,52	0,07	0,76	1,98	11,28	3,49	17,51
SA	0	10	0	0	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	21,74	0,00	0,00	21,74
SCA	1	4 1/3	0	1	1,00	0,43	1,00	1,00	7,61	9,45	21,74	48,91	87,71

Tabela 11 - Matriz de decisão das argamassas expostas ao sulfato de magnésio ($MgSO_4$) para os subcritérios - nível 3 de “Durabilidade”

COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA	VALORES ATRIBUÍDOS				VALORES NORMALIZADOS				NOTA NOS SUBCRITÉRIOS				DESEMPENHO QUANTO AO ATAQUE POR $MgSO_4$
	Varição da VUP	Varição de massa	Varição volumétrica	Varição da resistência à compressão	Varição da VUP	Varição de massa	Varição volumétrica	Varição da resistência à compressão	Varição da VUP	Varição de massa	Varição volumétrica	Varição da resistência à compressão	
CPV	0,00	4,00	1/3	1/10	0,00	1,00	0,58	0,35	0,47	0,00	21,74	12,68	72,09
CV	1 3/7	1 1/3	1/4	1/9	1,00	0,33	0,17	0,08	0,10	21,74	7,25	3,62	84,07
MT	5/6	2/3	1/6	1/10	1,00	0,81	0,53	0,47	0,49	7,61	6,17	4,00	63,05
SA	1/2	1/3	1/6	1/13	0,87	1,00	0,87	0,69	0,56	42,74	48,91	42,74	46,85
SCA	2/3	2/5	1/6	1/16	0,00	1,00	0,58	0,35	0,47	0,00	21,74	12,68	43,57

Assim como indicado por Souza (2016), a alternativa SCA apresentou melhor desempenho quanto à durabilidade ao Na_2SO_4 , seguida das alternativas CV, CPV, SA e MT. Adicionalmente, observa-se ainda que a argamassa com a incorporação de CV, quando submetida ao ataque por Na_2SO_4 obteve um desempenho melhor quando comparadas com a argamassa sem adições (CPV). Corroborando assim os resultados observados por Souza (2016). O mesmo comportamento não é observado para o desempenho das alternativas expostas ao $MgSO_4$, tendo a CV apresentado maior desempenho, seguida das alternativas CPV, MT, SA e SCA.

Em sequência, foi realizada a análise da matriz de decisão para o nível 2 do critério “Durabilidade”, sendo o procedimento realizado com o auxílio dos pesos relativos indicados na Tabela 5 e apresentado na Tabela 12.

Considerando os dados apresentados, a série SCA apresentou o maior índice de desempenho quanto à durabilidade ao ataque por sulfato, independente do tipo de sulfato utilizado, seguida das alternativas CV, CPV, MT e SA.

Por fim, tendo conhecimento dos desempenhos das alternativas nos subcritérios da matriz hierárquica, é possível obter o desempenho final das diferentes argamassas frente aos critérios do nível 1. A Tabela 13 apresenta a matriz de decisão utilizada, tendo como base os pesos relativos apresentados na Tabela 2. Cabe ressaltar que, assim como realizado nas demais análises, o critério “Econômico” teve seu valor invertido, visto que um menor valor de m^3 para a produção do compósito representa o melhor cenário para a confecção das argamassas.

Considerando a análise conjunta de todos os critérios, a alternativa SCA apresentou o maior índice de desempenho em relação às demais, seguida das alternativas CV, SA, CPV e MT. É possível observar a importância dos pesos relativos na composição do desempenho final das alternativas. Avaliando-se o desempenho final das alternativas em cada critério do nível 1 observa-se que a alternativa SCA apresentou os maiores valores de desempenho em todos os critérios analisados, resultando no seu maior índice de desempenho. Em sequência, tem-se a um maior desempenho da cinza volante, da sílica ativa, da série sem adição (CPV) e do metacaulim.

Por fim, a Figura 3 mostra a composição percentual do índice de desempenho final das diferentes alternativas ao considerar os critérios do nível 1 da matriz hierárquica, sendo possível observar o maior impacto do critério “Durabilidade”, seguido dos critérios “Propriedades mecânicas”, “Sustentabilidade” e “Econômico”, no índice de desempenho de todas as alternativas. Dessa maneira, apesar da evidente influência do critério “Durabilidade” no resultado final, em casos de estruturas de concreto reais evidencia-se a necessidade da análise conjunta de diversos fatores para escolha de um material.

Diversos estudos apontam que as adições minerais, quando utilizadas como parte da composição do aglomerante de argamassas e concretos, diminuem a disponibilidade de hidróxido de cálcio e de C_3A e, conseqüentemente, promovem a diminuição ou mitigação do ataque externo por sulfatos (Siad *et al.*, 2013; Hoppe Filho *et al.*, 2015; Tanyildizi, 2016; Souza; Medeiros; Hoppe Filho 2020a, 2020b). Porém, é necessário cautela com tal afirmação, visto que é possível observar uma diferença no desempenho dos materiais quanto à durabilidade conforme o tipo de sulfato presente na solução agressiva (Figura 4).

Tabela 12 - Matriz de decisão das argamassas expostas ao ataque por sulfatos para os subcritérios - nível 2 de “Durabilidade”

COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA	VALORES OBTIDOS		VALORES NORMALIZADOS		NOTA NOS SUBCRITÉRIOS		ÍNDICE DE DESEMPENHO QUANTO À DURABILIDADE
	Sulfato de sódio (Na ₂ SO ₄)	Sulfato de magnésio (MgSO ₄)	Sulfato de sódio (Na ₂ SO ₄)	Sulfato de magnésio (MgSO ₄)	Sulfato de sódio (Na ₂ SO ₄)	Sulfato de magnésio (MgSO ₄)	
CPV	13,10	72,09	0,15	0,86	7,47	42,87	50,34
CV	13,64	84,07	0,16	1,00	7,77	50,00	57,77
MT	6,44	63,05	0,07	0,75	3,67	37,50	41,17
SA	21,74	46,85	0,25	0,56	12,39	27,86	40,26
SCA	87,71	43,57	1,00	0,52	50,00	25,92	75,92

Tabela 13 - Matriz de decisão das argamassas expostas ao ataque por sulfatos

COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA	VALORES ATRIBUÍDOS				VALORES NORMALIZADOS				NOTA NOS CRITÉRIOS				ÍNDICE DE DESEMPENHO
	Propriedades mecânicas	Econômico	Sustentabilidade	Durabilidade	Propriedades mecânicas	Econômico	Sustentabilidade	Durabilidade	Propriedades mecânicas	Econômico	Sustentabilidade	Durabilidade	
CPV	70,47	1/281,11	61,78	50,34	0,71	0,67	1,00	0,66	18,00	6,02	8,96	37,54	70,52
CV	90,84	1/291,32	83,23	57,77	0,91	0,65	1,46	0,76	23,20	5,81	13,07	43,08	85,16
MT	77,05	1/234,39	76,32	41,17	0,77	0,81	1,24	0,54	19,68	7,23	11,07	30,69	68,67
SA	94,10	1/214,95	96,00	40,26	0,94	0,88	1,55	0,53	24,03	7,88	13,93	30,02	75,85
SCA	99,73	1/188,96	100,00	75,92	1,00	1,00	1,62	1,00	25,47	8,96	14,51	56,60	105,55

Figura 3 - Composição percentual do índice de desempenho das alternativas nos critérios do nível 1 da matriz hierárquica

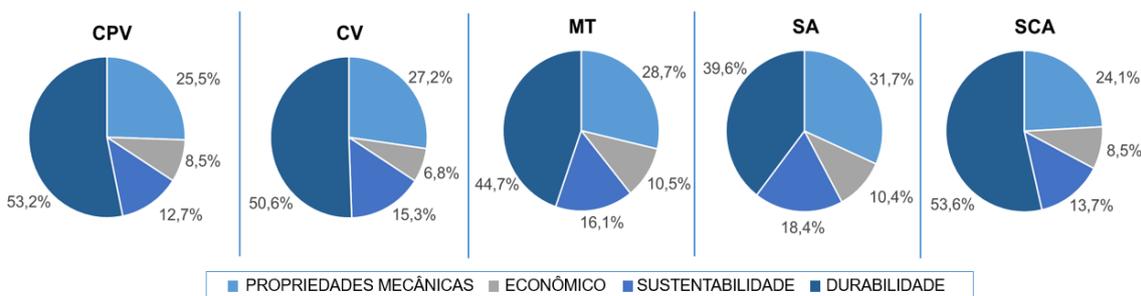
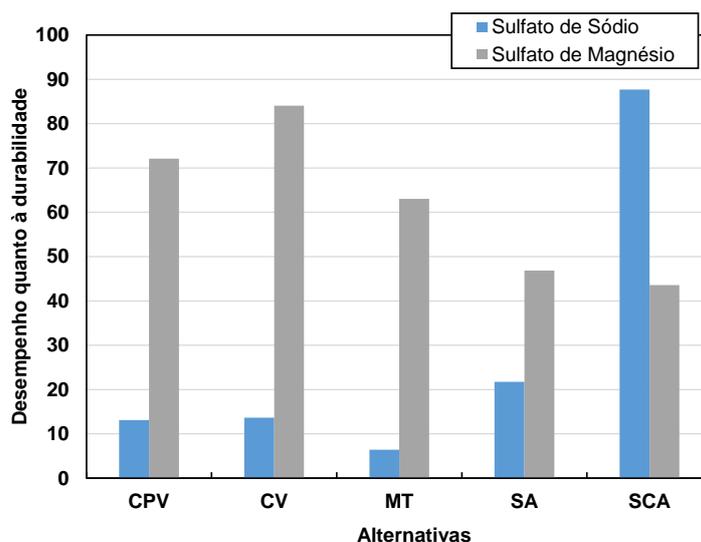


Figura 4 - Desempenho das argamassas referente ao critério “Durabilidade” para as fontes de íons sulfato separadamente



A incorporação de cinza volante no aglomerante das argamassas promoveu um melhor desempenho quanto à durabilidade quando comparado ao CPV ao ataque de ambas as soluções de sulfato. Sendo a melhor alternativa dentre as analisadas quando há exposição do compósito cimentício ao $MgSO_4$. O metacaulim, apesar de apresentar um desempenho intermediário frente ao ataque por $MgSO_4$, apresentou maior variação de massa, maior variação volumétrica e maior perda de resistência à compressão quando exposto ao Na_2SO_4 , mostrando-se a pior alternativa dentre as analisadas. Tal fato é explicado pelo elevado teor de alumina em sua composição, que propicia a formação de fases aluminatos disponíveis para a formação de produtos expansivos resultantes da interação com os íons sulfatos (Souza; Medeiros; Hoppe Filho, 2018).

A sílica ativa e a sílica de casca de arroz apresentaram comportamentos antagônicos frente as duas fontes de contaminação, sendo eficazes quanto expostas ao Na_2SO_4 e altamente susceptíveis à degradação promovida pelo $MgSO_4$. Segundo Siad *et al.* (2013), o elevado consumo de portlandita devido às reações pozolânicas destas adições reduz o potencial de formação de gipsita e etringita, promovendo a melhoria na eficácia quanto ao ataque por Na_2SO_4 . Em contrapartida, as reações pozolânicas são responsáveis também pela diminuição do pH da matriz cimentícia, o que pode facilitar a desestabilização e descalcificação do C-S-H no ataque por $MgSO_4$ (Souza; Medeiros; Hoppe Filho, 2020a). Ortega *et al.* (2018) observaram ainda que a pouca disponibilidade de portlandita impede a formação da barreira dupla de brucita e gipsita, propiciando a difusão de íons e a promoção das reações de deterioração no interior da rede de poros.

A composição percentual do índice de desempenho nos critérios do nível 1 da matriz hierárquica (Figura 3) mostra a maior influência do critério “Durabilidade” para todas as alternativas. Porém, os dados apresentados na Figura 4 deixam claro a necessidade do conhecimento do ambiente em que a estrutura de concreto estará exposta, visto que a melhor opção de compósito de cimento Portland para um ambiente agressivo com Na_2SO_4 não é necessariamente a mesma para o caso do $MgSO_4$.

Dessa maneira, não pode-se classificar os cimentos como resistentes ao ataque por sulfato, baseando se exclusivamente em ensaios de laboratório que utilizam o Na_2SO_4 como agente agressivo. Mesmo sendo consolidada a influência do cátion associado ao íon sulfato no mecanismo de degradação dos compósitos cimentícios, a NBR 16697 (ABNT, 2018) define que para um cimento ser considerado resistente a sulfatos, as barras de argamassa confeccionadas com ele devem apresentar uma expansão linear máxima de 0,03% aos 56 dias de idade quando submetidos ao ensaio prescrito pela NBR 13583 (ABNT, 2014), ou seja, tendo como parâmetro exclusivamente a exposição ao Na_2SO_4 . Porém, após este trabalho, fica evidente que esta é uma prática falha, pois, esta denominação funciona apenas se a exposição em campo for igual à estabelecida pela norma em relação ao tipo de contaminante (Na_2SO_4) e ao teor de contaminação.

Estruturara hierárquica modificada

Assim como realizado em campo, a AHP apresentada no item anterior considerou a durabilidade dos dados de exposição aos dois sulfatos (Na_2SO_4 e $MgSO_4$) simultaneamente, com o intuito de se obter a melhor

alternativa em relação ao ataque por sulfato. Porém, os dados indicam que o caminho mais aconselhável é colocar como parâmetro de entrada inicial a resposta à pergunta: “Qual o tipo de sulfato está envolvido na sua especificação?”. Logo, tendo esta resposta definida é possível desenvolver a escolha da melhor alternativa para cada caso de exposição ao sulfato seguindo o mesmo caminho apresentado no item anterior. A estrutura hierárquica foi modificada e, ao contrário da anterior, apresenta 2 níveis, sendo o desempenho quanto ao critério “Durabilidade” desenvolvido com dados de ensaios realizados para o tipo de sulfato que se pretende proceder a escolha, como mostra a Figura 5 (Figura 2 modificada).

Apesar da importância do comportamento em relação à durabilidade frente ao ataque por sulfato, a aplicação dos materiais em campo torna necessária a análise de outros critérios aliados à durabilidade, como por exemplo, propriedades mecânicas, economia e sustentabilidade, além da especificação do tipo de sulfato presente no ambiente. A Figura 6 apresenta o índice de desempenho dos critérios no nível 1 para as diferentes alternativas, considerando a exposição à ambientes com Na₂SO₄ (Figura 6a) e MgSO₄ (Figura 6b) separadamente. O cálculo do índice de desempenho foi realizado seguindo os mesmos passos das matrizes de decisão apresentadas anteriormente, atribuindo também os mesmos pesos para cada critério, considerando a presença de um sulfato apenas no ambiente.

Através da AHP, é possível observar que as composições do aglomerante contendo 10% de cinza volante, metacaulim, sílica ativa e sílica de casca de arroz apresentaram um índice de desempenho superior ao da alternativa sem adição (CPV) ao considerar a exposição ao Na₂SO₄. Porém, apenas a alternativa CV apresentou índice de desempenho maior que a CPV para a contaminação por MgSO₄, sendo este comportamento semelhante ao obtido na análise do critério “Durabilidade”. De acordo com a base de dados do presente estudo, a série CPV apresentou expansão positiva nessa condição de exposição, evidenciando o período de expansão do ataque. As demais alternativas apresentaram uma desintegração parcial dos corpos de prova, resultante da interação com a solução agressiva.

Figura 5 - Estrutura hierárquica modificada dos critérios e subcritérios para o caso de especificação do tipo de sulfato como dado de entrada

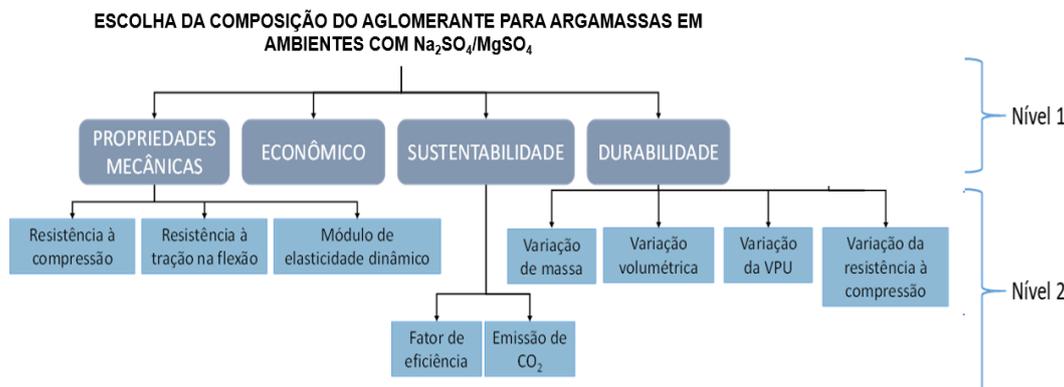
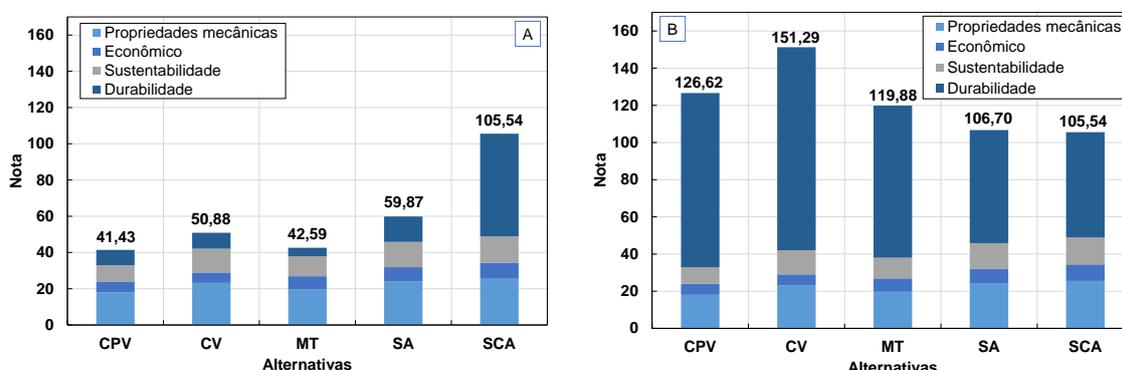


Figura 6 - Índice de desempenho das diferentes composições de argamassa para o ataque por sulfatos ao considerar a estrutura hierárquica modificada. (a) Na₂SO₄; (b) MgSO₄



O metacaulim, por sua vez, mesmo apresentando menor durabilidade frente aos íons sulfato proveniente da exposição ao Na_2SO_4 , apresentou um bom desempenho quando comparado a série CPV ao considerar o conjunto de critérios escolhidos. Tal fato pode ser atribuído à maior representatividade do critério “Propriedades Mecânicas” na análise do índice de desempenho das alternativas através da matriz hierárquica modificada para o Na_2SO_4 como mostra a Figura 7.

Apesar da aplicação dos mesmos pesos relativos, a SCA teve o seu índice de desempenho composto em maioria pelo critério “Durabilidade”, devido, provavelmente, ao seu comportamento contraditório ao das demais alternativas quanto à variação na resistência à compressão. De acordo com Müllauer, Beddo e Heinz (2013), a formação dos produtos expansivos divide-se em três fases distintas:

- ocorre a formação da etringita proveniente das fases aluminato em pequenos poros, resultando em uma pressão acompanhada de pouca expansão e danificação;
- a pressão exercida pelos cristais de etringita aliado à formação da gipsita, supera a resistência da matriz cimentícia, promovendo a rápida expansão e, conseqüentemente, o aparecimento de fissuras macroscópicas; e
- a taxa de formação dos produtos expansivos diminui devido à baixa disponibilidade de fases aluminato, resultando em uma mínima expansão.

Dessa maneira, assume-se que ao final de 140 dias de exposição ao Na_2SO_4 , a alternativa SCA encontra-se ainda no primeiro estágio descrito, enquanto as demais no segundo ou terceiro estágio, resultando em uma diminuição na resistência à compressão das argamassas.

Por fim, a Figura 8 mostra a composição percentual do índice de desempenho das alternativas para a exposição ao MgSO_4 .

Ao contrário do observado anteriormente, o índice de desempenho das argamassas expostas ao MgSO_4 apresentaram, em sua composição, a presença majoritária do critério “Durabilidade”, evidenciando o maior nível de deterioração dessas amostras e, conseqüentemente, a maior necessidade em se considerar tal critério em uma escolha prática. Em segundo lugar tem-se os critérios “Propriedades mecânicas”, “Sustentabilidade” e “Econômico”.

Figura 7 - Composição percentual do índice de desempenho das alternativas nos critérios do nível 1 da matriz hierárquica modificada para o Na_2SO_4

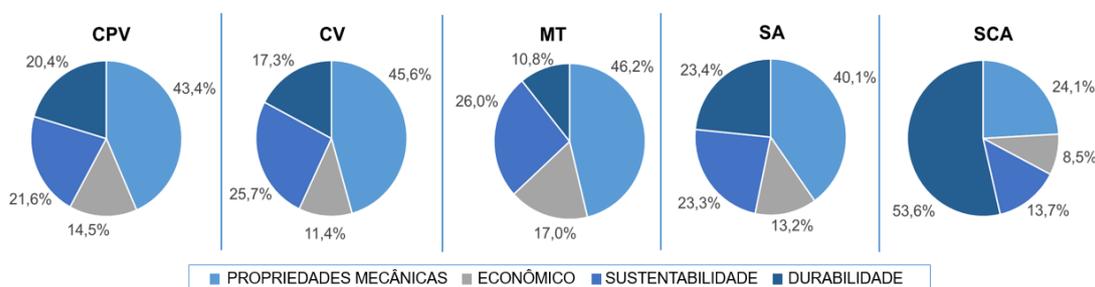
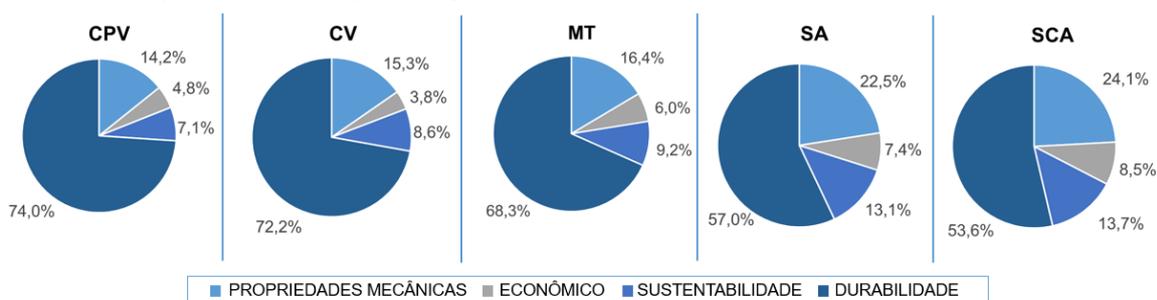


Figura 8 - Composição percentual do índice de desempenho das alternativas nos critérios do nível 1 da matriz hierárquica modificada para o MgSO_4



Cabe ressaltar que, em ambas as análises, o critério “Sustentabilidade” possui maior representatividade que o “Econômico” na formação do índice de desempenho das alternativas, indicando o benefício da incorporação de resíduos de outras indústrias na construção civil.

Por fim, considerando o explanado, tem-se que a especificação de materiais para resistir a ambientes contendo exposição das estruturas ao ataque por sulfato é muito complexo, não sendo apropriado tratar o tema de forma genérica. Logo, torna-se necessária a especificação do tipo de sulfato presente no ambiente para a correta escolha dos materiais que irão compor a porção aglomerante do compósito cimentício. Cabe ressaltar que este trabalho realizou a análise considerando apenas dois tipos de sulfatos, porém, na natureza, existem outros tipos que podem agredir os compósitos de cimento Portland (K_2SO_4 , $(NH_4)_2SO_4$), agregando ainda mais complexidade ao tema dos estudos que tem como foco a obtenção de estruturas de concreto mais duráveis em ambientes de elevada agressividade ambiental.

Conclusões

O processo de análise hierárquica (AHP) se mostrou uma ferramenta eficaz para a escolha em campo da composição do aglomerante de argamassas submetidas ao ataque de sulfatos, visto que, através dessa metodologia é possível considerar diferentes critérios importantes para o desempenho dos compósitos cimentícios em geral. Além disso, é possível evidenciar a sua utilização na tomada de decisões e sua aplicabilidade na construção civil, sendo importante ressaltar a singularidade de cada análise e sua adaptação para diferentes cenários, de acordo com a necessidade do usuário.

Em relação à escolha da composição do aglomerante para argamassas expostas ao ataque por sulfatos de sódio e magnésio, a substituição parcial do cimento por sílica de casca de arroz, em um teor de 10% resultou no maior desempenho quando considerados critérios relacionados às propriedades mecânicas, sustentabilidade, durabilidade e economia. Porém, viu-se a necessidade do uso de uma EH específica para cada tipo de sulfato presente no ambiente para a correta escolha dos materiais, visto que a durabilidade das alternativas se encontra relacionada ao cátion associado ao íon sulfato.

A sílica de casca de arroz foi a adição de argamassa que apresentou melhor índice de desempenho para a exposição ao sulfato de sódio (Na_2SO_4), porém, a pior opção quando utilizado o sulfato de magnésio ($MgSO_4$). Neste caso, a cinza volante foi a adição que apresentou maior índice de desempenho. Cabe ressaltar ainda que o critério “Propriedades mecânicas” representou a maior parcela do índice de desempenho das alternativas expostas ao Na_2SO_4 . Em contrapartida, para a exposição ao $MgSO_4$ o critério “Durabilidade” apresentou maior representatividade, indicando a maior agressividade do contaminante e a necessidade de considerar este parâmetro na escolha da composição do aglomerante de estruturas de concreto expostas a ambientes semelhantes.

Dessa maneira, é um erro conceber a classificação dos cimentos como resistentes a sulfatos, baseando se exclusivamente em ensaios de laboratório que utilizam o Na_2SO_4 como agente agressivo. No que diz respeito ao ataque por sulfatos é importante ressaltar que na natureza existem diversos tipos, tornando o assunto complexo. Assim, identificar o tipo de sulfato ao qual as estruturas de concreto estão submetidas é primordial, pois adições que podem ser benéficas a um tipo de meio agressivo pode não ser o indicado para outro meio.

Referências

- 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, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: cimento Portland: determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E1765**: standard practice for applying analytical hierarchy process (AHP) to multiattribute decision analysis of investments related to projects, products and processes. West Conshohocken, 2016.
- ATAHAN, H. N.; DIKME, D. Use of mineral admixtures for enhanced resistance against sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3450-3457, 2011.

- BONAKDAR, A.; MOBASHER, B. Multi-parameter study of external sulfate attack in blended cement materials. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 61-70, 2010.
- CHENG, E. W. L.; LI, H.; HO, D. C. K. Analytical hierarchy process (AHP): a defective tool when used improperly. **Measuring Business Excellence**, v. 6, n. 4, p. 33-37, 2002.
- COSTA, H. G. **Auxílio multicritério à decisão: método AHP**. São Carlos: ABEPRO, 2006.
- COSTA, H. G. **Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 36., Niteroi, 2002. **Proceedings [...]** Niteroi, 2002.
- DAMINELLI, B. L. *et al.* Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, p. 555-562, 2010.
- DOLAN, J. G. Shared decision-making: transferring research into practice: the analytic hierarchy process. **Patient Educational and Counseling**, v. 73, p. 418-425, 2008.
- GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. GNR project reporting CO2: gross CO2 emissions, distribution excluding CO2 from on-site power generation - Grey and white cementitious products, year of 2018. Disponível em: <https://gccassociation.org/gnr/>. Acesso em: 24 set. 2020.
- HOPPE FILHO, J. *et al.* Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores. **Cerâmica**, v. 61, p. 168-177, 2015.
- IKUMI, T.; CAVALARO, S. H. P.; SEGURA, I. The role of porosity in external sulphate attack. **Cement and Concrete Composites**, v. 97, p. 1-12, 2019.
- IRASSAR, E. F. Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler: a review. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 241-254, 2009.
- IRASSAR, E. F.; MAIO, A.; BATIC, O. R. Sulfate attack on concrete with mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 1, p. 113-123, 1996.
- JUENGER, C. G. M.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 78, Part A, p. 71-80, 2015.
- MEDEIROS, M. H. F. *et al.* Pozolanas de elevada reatividade: uma avaliação crítica do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal usando Difração de Raios X. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 19-29, jul./set. 2015.
- MENÉNDEZ, E. *et al.* Review of the incidence of the sulphate attack in Spain: evaluation of field concrete cases. In: MENÉNDEZ, E.; BAROGHEL-BOUNY, V. (ed.). **External sulphate attack: field aspects and lab tests**. Cham: Springer, 2020.
- MÜLLAUER, W.; BEDDO, R. E.; HEINZ, D. Sulfate attack expansion mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 52, p. 208-215, 2013.
- ORTEGA, J. M. *et al.* Short-term performance of sustainable silica fume mortars exposed to sulfate attack. **Sustainability**, v. 10, n. 7, p. 2517, 2018.
- PINTO, S. R. *et al.* Durability of phosphogypsum-based supersulfated cement mortar against external attack by sodium and magnesium sulfate. **Cement and Concrete Research**, v. 136, p. 106172, 2020.
- RANJANI, G. I. S.; RAMAMURTHY, K. Behaviour of foam concrete under sulphate environments. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 825-834, 2012.
- SAATY, T. L. Some mathematical concepts of the analytic hierarchy Process. **Behaviormetrika**, v. 29, p. 1-9, 1991.
- SIAD, H. *et al.* Characterization of the degradation of self-compacting concretes in sodium sulfate environment: Influence of different mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1188-2000, 2013.
- SINGH, B. Waste and supplementary cementitious materials in concrete: characterisation, properties and applications. In: SIDDIQUE, R.; CACHIM, P. **Waste and supplementary cementitious materials in concrete: characterization, properties and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2018.
- SIRISAWAT, I. *et al.* Durability and testing of mortar with interground fly ash and limestone cements in sulfate solutions. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 39-46, 2014.

SOUZA, D. **Capacidade de adições minerais em mitigar o ataque por sulfatos de sódio e magnésio em argamassas de cimento Portland**. Curitiba, 2016. 229 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SOUZA, D. J. *et al.* The uses of finely ground materials to mitigate the external sulphate attack (ESA) on cementitious materials. In: MENÉNDEZ, E.; BAROGHEL-BOUNY, V. (ed.). **External sulphate attack: field aspects and lab tests**. Cham: Springer, 2020.

SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE FILHO, J. Evaluation of external sulfate attack (Na_2SO_4 and Mg_2SO_4): Portland cement mortars containing siliceous supplementary cementitious materials. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 4, 2020a.

SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE FILHO, J. Evaluation of external sulfate attack (Na_2SO_4 and Mg_2SO_4): Portland cement mortars containing fillers. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 3, p. 644-655, 2020b.

SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE FILHO, J. Evaluation of the SR Portland cement against sodium and magnesium sulfate attack: a physical and comparative analysis of mortars. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 5, p. 1053-1075, 2018.

TANYILDIZI, H. The investigation of microstructure and strength properties of lightweight mortar containing mineral admixtures exposed to sulfate attack. **Measurement**, v. 77, p. 143-154, 2016.

WHITTAKER, M.; BLACK, L. Current knowledge of external sulfate attack. **Advances in Cement Research**, 1400089, 2015.

WU, J. *et al.* Effect of multiple ions on the degradation in concrete subjected to sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 259, p. 119846, 2020.

XIONG, C. *et al.* Influence of cation type on deterioration process of cement paste in sulfate environment. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 158-166, 2014.

Agradecimentos

Os autores expressam a sua gratidão às agências brasileiras CNPq, Capes e Fundação Araucária pelo apoio financeiro, bem como a Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao Departamento de Construção Civil (DCC), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), ao Centro de Estudos de Engenharia Civil (CESEC), ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME), ao Grupo de Patologia e Recuperação das Construções (PRC) e a Agência Nacional de Águas (ANA).

Andreza Frare

Curadoria de dados; Análise de dados; Recebimento de financiamento; Metodologia; Validação de dados e experimentos; Design da apresentação de dados; Redação do manuscrito original.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil | Universidade Federal do Paraná | Rua Evaristo F. Ferreira da Costa, 369-377, Jardim das Américas | Curitiba - PR - Brasil | CEP 82590-300 | Tel.: (46) 99985-6363 | E-mail: frareandrea@gmail.com

Marcella Amaral

Curadoria de dados; Análise de dados; Recebimento de financiamento; Metodologia; Validação de dados e experimentos; Design da apresentação de dados; Redação do manuscrito original.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil | Universidade Federal do Paraná | Tel.: (41) 3361-3110 | E-mail: marcellamarp@gmail.com

Diego Jesus de Souza

Pesquisa; Validação de dados e experimentos; Redação - revisão e edição.

Marie-Curie Postdoctoral Fellow | Technical University of Denmark | Brovej, Building 118, Room 040 | Copenhagen - Dinamarca | Tel.: +45 (81) 949917 | E-mail: diegojesusdesouza@hotmail.com

Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Conceitualização; Disponibilização de ferramentas; Supervisão; Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil | Universidade Federal do Paraná | Tel.: (41) 3361-3110 | E-mail: medeiros.ufpr@gmail.com

Editores: **Ercília Hitomi Hirota e Eduardo Pereira**

Editora convidada: **Juliana Parise Baldauf**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.