De 17/07/2024 a 20/07/2024
Fortaleza, Ceará.
DOI: 10.5281/zenodo.13117543

INFLUÊNCIA DO ELETRODO NO ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS SULFATOS EM CONCRETO

Rafael Fernando de Oliveira Juncos[1], Fernanda Brekailo[1]*; Eduardo Pereira[1]
*Autor de contato: fernandabrekailo@gmail.com

[1] Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil

RESUMO

O ensaio de migração de íon sulfato é um teste acelerado de penetração de íons em uma amostra de concreto. Uma diferença de potencial é aplicada ao ensaio através de um eletrodo. O objetivo desse estudo é avaliar se há alteração nos resultados do ensaio quando utilizado diferentes eletrodos. Para tanto, foram adotados fios de cobre e barras de aço e grafite, com um traço fixo de concreto de 1:2:3:0,55. A variação da concentração de sulfatos ao longo do tempo foi distinta para os três eletrodos, bem como a dispersão entre as cinco repetições realizadas do ensaio, sendo esta maior para o aço. Os eletrodos de cobre e aço apresentaram oxidação durante o ensaio, contudo os compostos identificados nas amostras de concreto são os mesmos para os três eletrodos. A morfologia dos compostos aponta uma diferença para ensaio com o eletrodo de aço, com os cristais de etringita aparecendo de forma mais dispersa pela amostra em comparação com os outros eletrodos.
Palavras-chave: Ensaio de migração de sulfatos; ataque externo por sulfatos, eletrodo.

ABSTRACT

The sulfate ion migration test is an accelerated test of ion penetration into a concrete sample. A potential difference is applied to the test through an electrode. The objective of this study is to evaluate whether there is a change in the test results when using different electrodes. Thus, copper wires and steel and graphite bars were adopted, with a fixed concrete mix of 1:2:3:0.55. The variation in sulfate concentration over time was different for the three electrodes, as well as the dispersion between the five repetitions of the test, which was greater for steel. The copper and steel electrodes showed oxidation during the test, however the compounds identified in the concrete samples are the same for the three electrodes. The morphology of the compounds is different for testing with the steel electrode, with the ettringite crystals appearing more dispersed throughout the sample compared to the other electrodes.
Keywords: Sulfate migration test; external sulfate attack; electrode.

1. INTRODUÇÃO

Estruturas de concreto são empregadas devido a sua versatilidade e facilidade de execução. Entretanto, sua durabilidade pode ser um fator limitante em ambientes agressivos à estrutura, podendo ocorrer manifestações patológicas que comprometem sua vida útil. Ambientes ricos em sulfatos como solos de regiões costeiras ou áreas com influência de chuvas ácidas são considerados agressivos ao concreto (Liu *et al.*, 2020). O ataque externo por sulfato é um fenômeno de

degradação de estruturas de concreto de cimento Portland que ocorre pela penetração de SO_4^{2-} na matriz cimentícia da estrutura, consumindo compostos de hidratação do concreto e formando novos cristais, como por exemplo, gipsita e etringita secundária (Zeidan; Bassuoni; Said, 2016; Skalny; Marchand; Odler, 2002). A degradação se dá pelo caráter de expansividade dos cristais em relação aos compostos originários, podendo dobrar de volume para a gipsita e aumentar até 7 vezes para a etringita (Monteny *et al.*, 2000). O resultado pode ser identificado por desplacamentos e esfarelamentos da superfície do concreto (Alyami *et al.*, 2019).

Para compreender melhor os efeitos do ataque externo por sulfato sobre a estruturas de concreto, destaca-se o ensaio de migração de íons. Esse ensaio, já consolidado na literatura para íons cloretos, é realizado através de uma célula de migração, composta por dois compartimentos, um preenchido por uma solução de cloreto (compartimento catódico) e o outro por água destilada (compartimento anódico), separados por uma amostra de concreto (Castellote; Andrade; Alonso, 2001). Uma diferença de potencial é aplicada entre os compartimentos, acelerando a passagem dos íons do compartimento com cloretos para o compartimento antes livre destes íons, e assim, é possível diminuir a duração do experimento comparado à situações de difusão natural (Castellote; Andrade; Alonso, 2001). Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a) apresentam a proposta de metodologia do ensaio de migração aplicado para soluções de sulfato.

O eletrodo empregado para fornecer tensão neste ensaio pode ser composto de diversos materiais. Para íons cloreto, Castellote, Andrade e Alonso (2001) avaliam o uso de aço e cobre, obtendo resultados próximos nos dois casos. Andrade, D'Andrea e Rebolledo (2013) utilizam barras de aço, que de acordo com os autores, apresentam uma oxidação que é importante para reduzir a formação de gás cloro, composto tóxico. Zhang e Ba (2012), ao comparar eletrodos de grafite, aço inoxidável e latão concluem que o grafite apresenta resultados mais próximos ao ensaio de difusão natural, que consiste na exposição sem aplicação de tensão à solução de cloreto. Para a migração de sulfatos, Huang *et al.* (2016) e Li *et al.* (2020) utilizam ferro no compartimento catódico e titânio no anódico devido à oxidação do eletrodo ocorrer apenas no compartimento catódico e não haver a necessidade de inibir a formação de gases tóxicos para sulfatos.

O intuito dessa pesquisa é avaliar a influência do eletrodo no ensaio de migração de sulfatos através de análises físico-químicas e de microestrutura do concreto, sendo adotados como condutores fios de cobre, barras de grafite e de aço.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais e dosagens

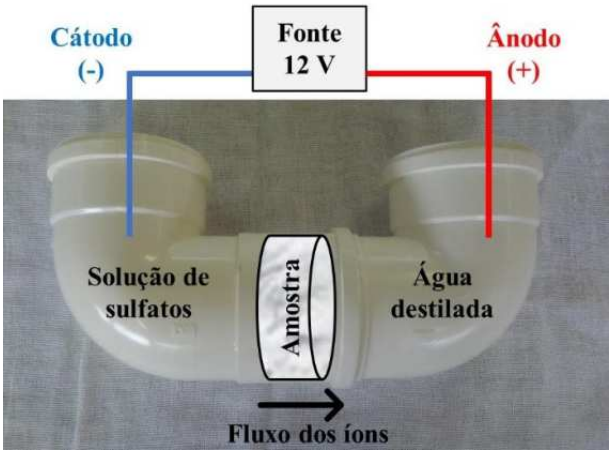
O aglomerante utilizado para o concreto foi o cimento Portland tipo II com adição de fíler e resistência à compressão de 32 MPa (CP II F 32), com perda ao fogo de 11,41%. O agregado miúdo utilizado foi areia proveniente de leito de rio com DMC de 2,36 mm e o agregado graúdo foi o pedrisco de diabásio, com DMC de 12,5 mm.

O traço do concreto foi de 1:2:3 com relação água/cimento de 0,55 e abatimento do tronco de cone de 100 ± 20 mm, determinado conforme a norma NBR 16889 (ABNT, 2020). Para manter o abatimento foi utilizado superplastificante na proporção de 0,35% da massa de cimento. Foram moldados 20 corpos de prova em moldes metálicos de ∅100x200 mm, adensados manualmente, desmoldados após 24h e mantidos em cura em imersão em água saturada com cal durante 28 dias, seguindo a norma NBR 5738 (ABNT, 2015).

2.2 Procedimentos experimentais

A metodologia para ensaios de migração de íons cloreto é normatizada pela norma espanhola UNE 83987 (2002). Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a) propõe uma adaptação da metodologia para aplicação em ensaios de migração de íons sulfatos, que foi utilizada nesta pesquisa. O ensaio de migração de sulfatos é composto por uma célula dividida em dois compartimentos. No compartimento anódico é colocada água destilada e no catódico a solução de sulfato, sendo 1,2 litros em ambos. A amostra de concreto separa os dois compartimentos, sendo vedada com selante de poliuretano, permitindo que a única passagem dos íons seja através do concreto. A amostra é um disco de concreto de 25 ± 2 mm, extraído da região central dos corpos de prova através de uma serra circular diamantada. Três discos foram retirados de cada corpo de prova, respeitando os limites propostos por Medeiros *et al.* (2012), que conclui que podem ser retirados 3 discos de 50 mm da região central do corpo de prova sem prejuízo dos resultados. No ensaio aplica-se uma tensão constante de 12V. Os eletrodos utilizados foram fios rígidos de cobre de Ø25 mm, eletrodos de solda de grafite para chanfros e goivagem em metal, com Ø4,7 mm e barras de aço CA-50 com Ø10 mm. Para cada situação de análise, foram montadas 5 células de migração.

Figura 1 - Esquema de montagem das células de migração



Fonte: Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a).

As soluções para o compartimento catódico foram preparadas tanto para sulfato de sódio como sulfato de magnésio, com concentração de SO_4^{2-} fixada em 6,763%, que corresponde a 10% de teor de sulfato de sódio na solução. Este valor é definido pela NBR 13583 (ABNT, 2013) na avaliação da resistência de argamassas à sulfatos. A Tabela 1 apresenta a composição das soluções.

Tabela 1 - Composição das soluções de sulfato utilizadas

Solução		Água Destilada (g)	Reagente (g)	Teor de SO_4^{2-} (g)
% de SO_4^{2-}	Reagente			
6,763	Na_2SO_4	900,00	100,00	67,63
6,763	$MgSO_4\,7H_2O$	826,46	173,54	67,63

Fonte: os autores.

O ensaio teve duração de 30 dias, sendo aferida a concentração de sulfatos no compartimento anódico diariamente através da condutividade da solução. As fontes eram desligadas e a solução presente no compartimento anódico era homogeneizada, sendo feita posteriormente a medição. A correlação adotada entre as medidas de condutividade (em mS/cm) e a concentração de SO_4^{2-} é apresentada nas Equações 1 e 2, conforme propõe Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023b).

$$\text{Para } Na_2SO_4\text{: Concentração de } SO_4^{2-} = 0{,}0480.\,\text{Condutividade (mS/cm)} \quad (1)$$
$$\text{Para } MgSO_4\text{: Concentração de } SO_4^{2-} = 0{,}0805.\,\text{Condutividade (mS/cm)} \quad (2)$$

Para detectar a formação de compostos oriundos do ataque por sulfato, foi avaliada a microestrutura da amostra através de imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura equipado com EDS. As amostras foram preparadas com metalização em ouro e com espessura de aproximadamente 3 mm. Também foi efetuado o ensaio de difratometria de raio X (DRX) a fim de verificar a presença de produtos de degradação dos eletrodos no concreto. O microscópio é um FEG SEM Tescan Mira 3, com detectores SE, BSE e microssonda analítica de raios X Oxford X-Maxn 50 (EDS) e o difratômetro um Rigaku Ultima IV. Para análise visual, foram também feitas imagens dos eletrodos e dos compartimentos ao início e ao fim do ensaio de migração, a fim de comparar o estado de degradação e os produtos depositados no fundo do compartimento para os três eletrodos.

Por fim, foi realizada a comparação da variação dos resultados da concentração de sulfatos através do desvio padrão combinado (S_p). Esse desvio se dá pela média ponderada das variâncias de cada dia de análise (Equação 3), visto que as variáveis do ensaio são replicadas cinco vezes. Valores maiores indicam maiores variações nos resultados. A comparação dos desvios é dada pela relação $S_{eletr.}/S_{cobre}$, onde o primeiro indica o desvio padrão combinado do eletrodo a ser comparado e o segundo o desvio do fio de cobre, sendo esse adotado como referência por ter sido o material utilizado por Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a).

$$S_p = \frac{\sqrt{S_{dia1}{}^2 + S_{dia2}{}^2 + \ldots + S_{dia30}{}^2}}{30} \quad (3)$$

Onde:
S_p = desvio padrão combinado;
S_{dia} = desvio padrão das cinco amostras no dia.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

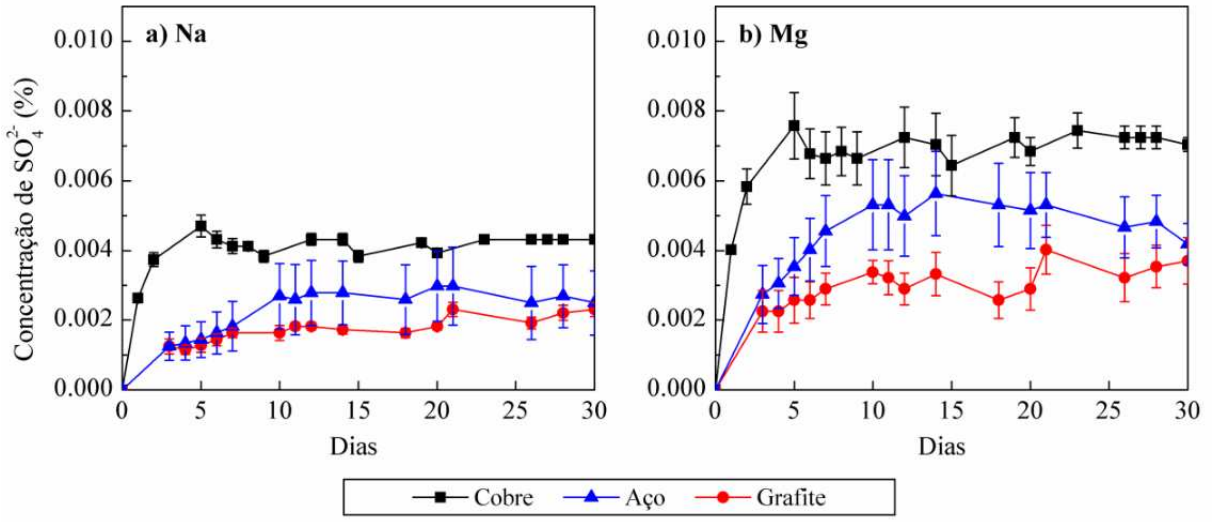
3.1 Concentração de sulfatos

Após os 30 dias de ensaio, a condutividade aferida diariamente foi correlacionada com a concentração de sulfatos através das Equações 1 e 2. Os gráficos da Figura 2 dispões esses resultados, sendo a Figura 2a relativa ao sulfato de sódio (Na) e a Figura 2b relativa ao sulfato de magnésio (Mg). Inicialmente é possível observar que as maiores concentrações de sulfato foram encontradas para o sulfato de magnésio. Esse comportamento foi observado também por Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023b), o que os autores associam à maior mobilidade iônica do magnésio em relação ao sódio.

Quanto aos diferentes eletrodos empregados, pode ser verificado que as barras de grafite e de aço apresentaram comportamento diferente do cobre, sendo esse com um pico de concentração aos 5 dias e estabilizando com valores próximos desse pico, e o grafite e aço com picos menos identificáveis e com maiores variações. Outro ponto a se notar é a menor concentração de sulfatos apresentada pelo grafite e aço quando comparada com o cobre. Por fim, analisando a tabela 3, o eletrodo de grafite foi o que apresentou menor desvio padrão combinado, sendo a relação $S_{eletr.}/S_{cobre}$ desse material de 0,84 para o sulfato de sódio e de 0,68 para o sulfato de magnésio. O aço apresentou valores mais elevados, sendo a relação de 2,08 para o sulfato de magnésio e 22,02 para o sulfato de sódio. Isso significa dizer que o grafite apresentou variações menores que o cobre

entre as 5 repetições e o aço variações maiores, sendo o desvio para o aço com sulfato de magnésio aproximadamente 22 vezes maior que o cobre.

Figura 2 - Gráficos de concentração de sulfatos: a) sulfato de sódio, b) sulfato de magnésio.



Fonte: os autores.

Tabela 2 – Desvio padrão combinado das análises de condutividade

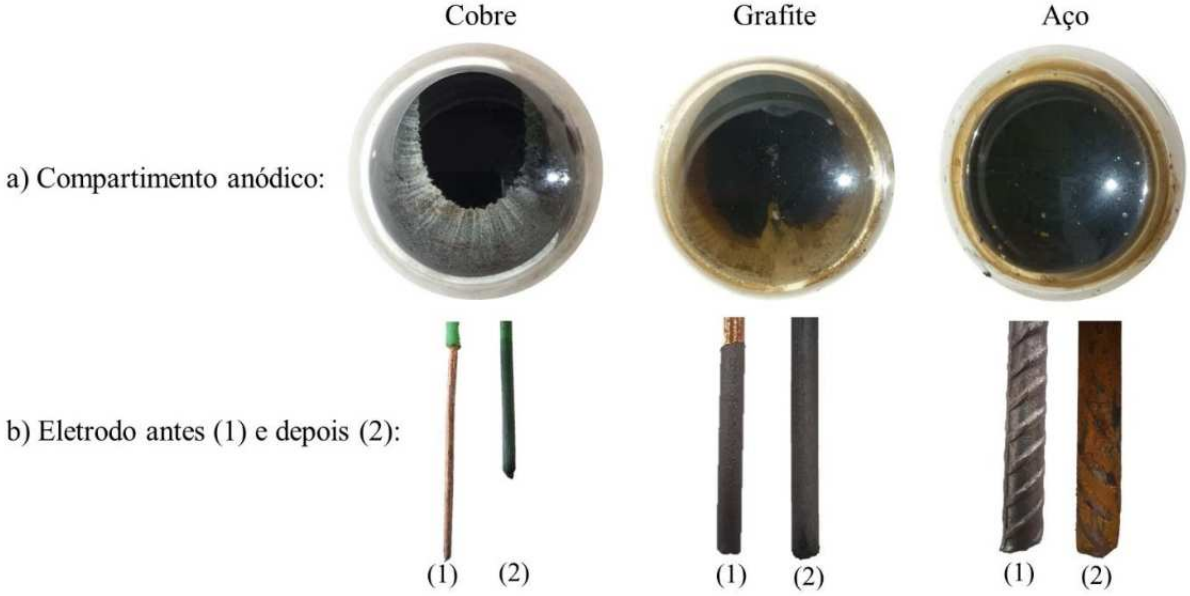
Material		S_c	Relação $S_{eletr.}/S_{cobre}$
Cobre	Na	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$	1,00
	Mg	$10{,}02 \cdot 10^{-5}$	1,00
Grafite	Na	$1{,}01 \cdot 10^{-5}$	0,84
	Mg	$6{,}79 \cdot 10^{-5}$	0,68
Aço	Na	$26{,}43 \cdot 10^{-5}$	22,02
	Mg	$20{,}86 \cdot 10^{-5}$	2,08

Fonte: os autores.

3.2 Eletrodos e compartimento anódico

Das imagens realizadas, pode-se comparar visualmente a turbidez do líquido do compartimento anódico, que incialmente é composto apenas por água destilada e com o decorrer do ensaio recebe o produto da oxidação do eletrodo. A Figura 3a apresenta a comparação dos compartimentos, onde é possível constatar que em todos os casos houve oxidação do eletrodo pela presença de partículas depositadas no fundo dos recipientes. Para os eletrodos de grafite e aço, ocorreu também a formação de um composto de tom escuro e viscoso, sendo a maior formação desse composto para o aço, onde pode ser observado que o compartimento ficou totalmente opaco.

Figura 3 - Compartimento anódico e eletrodos antes e após o ensaio de migração.



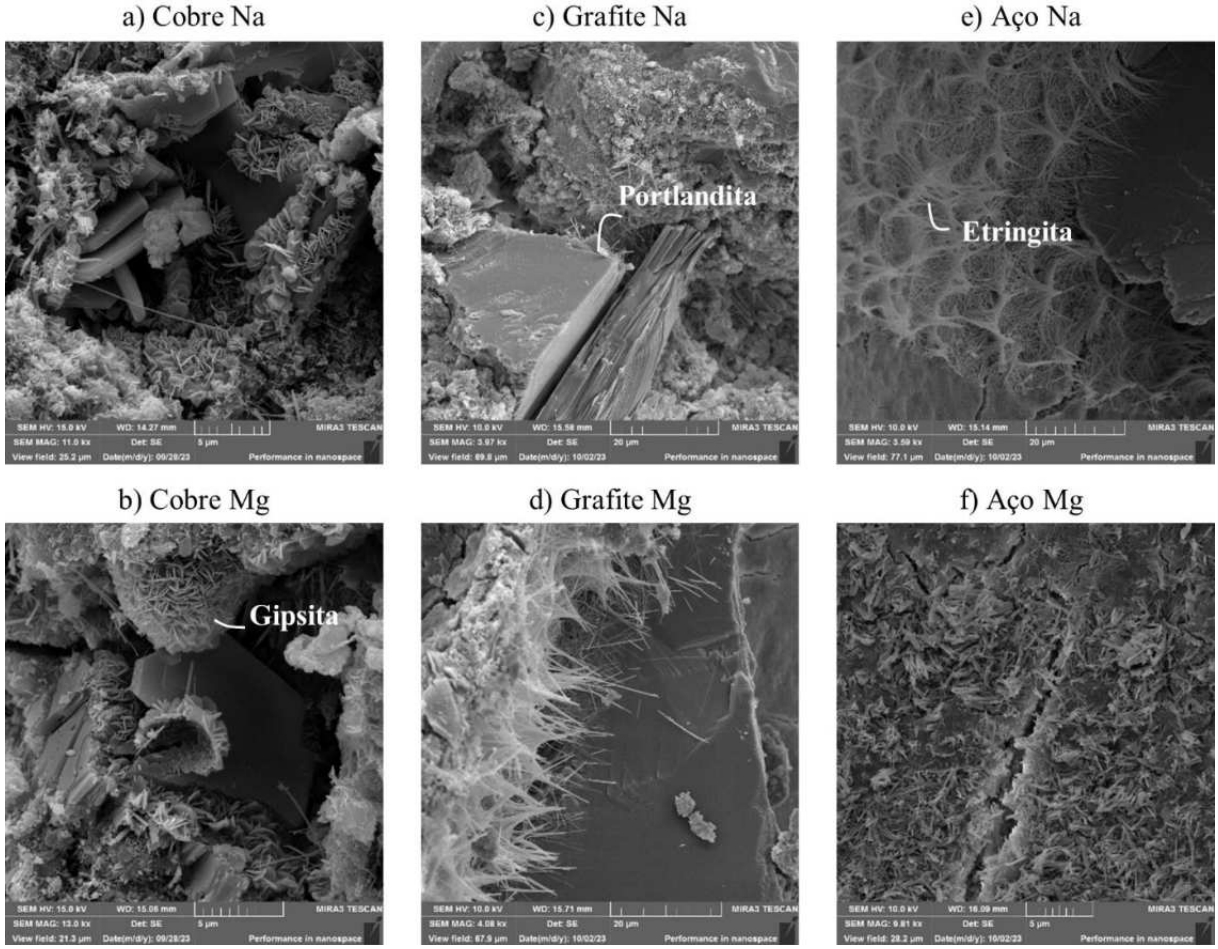
Fonte: os autores.

Da análise visual dos eletrodos, é feita uma comparação de antes e depois do ensaio. O fio de cobre foi o mais afetado pela oxidação, restando somente a região coberta pelo revestimento do fio (Figura 3). As barras de aço também sofreram forte corrosão, criando uma camada espessa de ferrugem que explica a opacidade da solução em que o eletrodo estava imerso. O grafite não apresentou mudanças significativas quanto à corrosão, porém é possível verificar a ocorrência do produto de oxidação através de seu compartimento anódico, que apresentou partículas depositadas em seu fundo. Zhang e Ba (2012) encontram resultados similares ao comparar a superfície dos eletrodos de latão, grafite e aço, não ocorrendo oxidação do grafite e formando uma corrosão de tom marrom escuro no aço.

3.3 Caracterização microestrutural do concreto

A Figura 4 apresenta a microestrutura das amostras de concreto após o fim do ensaio. A identificação do ataque por sulfato se dá pela presença de cristais de etringita e gipsita nos poros e vazio da amostra associados a cristais de portlandita em degradação (Mehta e Monteiro, 2006). Com isso em mente, é possível verificar a ocorrência do ataque em todas as imagens de microestrutura, uma vez que esses cristais estão presentes nas seis imagens. Nas Figura 4a e 4b estão as amostras com o cobre como eletrodo. Nos dois casos é possível notar a formação de cristais de gipsita com formato de rosáceas em torno de cristais de portlandita hexagonais em degradação. Nas Figura 4c e 4d, correspondentes às amostras com grafite, os mesmos cristais de portlandita são encontrados em degradação, mas, diferentemente do cobre, são observados cristais de etringita de formato de agulhas em seu entorno. Para as amostras com aço (Figura 4e e 4f), os cristais de etringita encontrados são dispostos de forma mais distribuída pela amostra, diferentemente dos outros eletrodos, onde os cristais se formavam agrupados. Também são observadas fissuras oriundas da expansão dos cristais nas imagens com aço, mas também ocorrendo para os outros eletrodos.

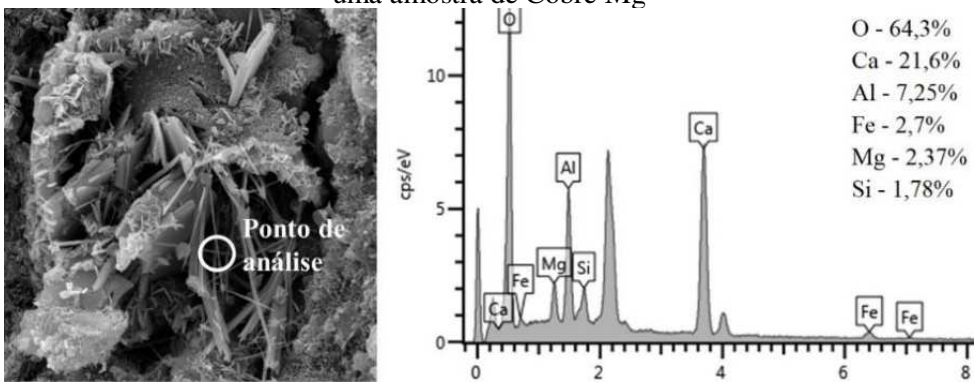
Figura 4 - Microestrutura das amostras de concreto após o ensaio



Fonte: os autores.

Um espectro por EDS foi realizado para obtenção da composição de um cristal. Devido à formação apresentar O, Ca, Al e Fe, pode-se concluir que é um cristal de etringita, pois são esses os principais compostos formadores da etringita. Uma pequena formação de Si foi encontrada, que aliado ao cálcio pode indicar o começo da formação de gel de M-S-H, sendo esse gel o produto da degradação do C-S-H (Huang, *et.al.,* 2015).

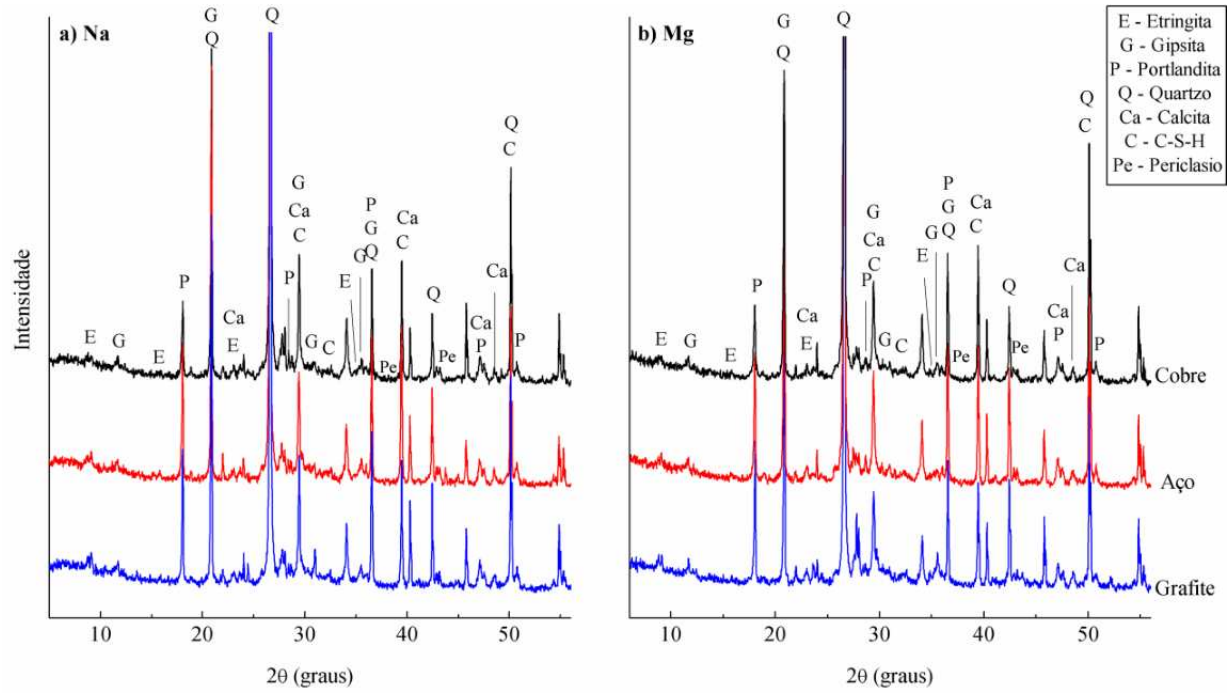
Figura 5 – Espectroscopia por dispersão de elétrons (EDS) de uma formação de cristais presentes em uma amostra de Cobre Mg



Fonte: os autores.

A Figura 6 apresenta o resultado das análises de DRX das amostras após o término do ensaio de migração. Como pode-se observar, para todas situações de análise os mesmos compostos foram identificados: picos de portlandita, C-S-H, etringita, gipsita, quartzo, calcita e periclásio. A etringita identificada pode ser aquela formada da hidratação do cimento, mas também pelo ataque por sulfato, acompanhada da gipsita neste caso.

Figura 6 – Difratograma de raios X das amostras de concreto após o ensaio de migração: a) sulfato de sódio, b) sulfato de magnésio.

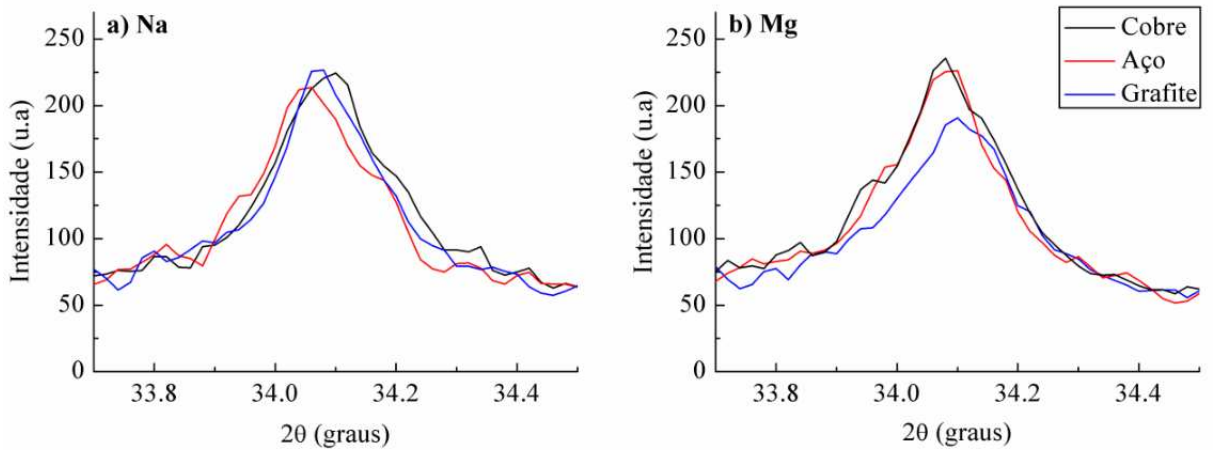


Fonte: os autores.

Nota-se que, apesar da diferença na morfologia dos cristais observada nas imagens da microestrutura, os compostos cristalinos presentes na matriz das amostras são os mesmos para os diferentes eletrodos. Desta forma, pode-se afirmar que o tipo de eletrodo não influenciou no tipo de composto formado, mas sim na forma que se apresentaram na matriz.

A fim de verificar se houve um maior ou menor consumo de portlandita em algum caso, indicando a formação de mais compostos no ataque por sulfatos, a Figura 7 compara os picos de maior intensidade da portlandita (34 º2θ) para os casos analisados. Como pode-se notar, não há diferença significativa entre os picos observados. Tal comportamento indica que, para os três eletrodos, o consumo de portlandita para formação de gipsita e etringita secundária foi próximo, não tendo impacto na cinética das reações.

Figura 7 – Análise comparativa do pico de maior intensidade da portlandita: a) sulfato de sódio, b) sulfato de magnésio.



Fonte: os autores.

4. CONCLUSÕES

Com a avaliação da influência do material do eletrodo no ensaio de migração de íons sulfatos, podemos concluir que:

- O eletrodo utilizado altera a concentração de íons sulfato que passa pela amostra e sua dispersão média dentro das repetições, sendo a maior variação para o aço;
- É possível verificar a ocorrência de cristais de gipsita e etringita em regiões características do ataque por sulfatos através das imagens de microestrutura das amostras para os três eletrodos analisados;
- Para o ensaio com eletrodo de aço, observa-se uma diferente morfologia dos cristais, apresentando-se de forma mais dispersa na amostra em comparação com o cobre e grafite;
- Os compostos cristalinos presentes nas amostras são os mesmos para os três eletrodos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Universidade Estadual de Ponta Grossa por fornecer a infraestrutura para esta pesquisa, em particular ao Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-LABMU), e a Fundação Araucária, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o Programa Nacional Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para financiamento na forma de bolsas de estudo.

REFERÊNCIAS

ALYAMI, Mohammed. H.; ALRASHIDI, Raid S.; MOSAVI, Hossein; ALMASHROUD, Mohammed A.; RIDING, Kyle A. Potential accelerated test methods for physical sulfate attack on concrete. **Construction and Building Materials**, v.229, dec, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116920.

ANDRADE, Carmen; D'ANDREA, Renata; REBOLLEDO, Nuria. Chloride ion penetration in concrete: The reaction factor in the electrical resistivity model. **Cement & Concrete Composites**, v. 47, p.41-46, out, 2013. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.09.022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BREKAILO, Fernanda; PEREIRA, Eduardo; MEDEIROS-JUNIOR, Ronaldo A. Migration test as an accelerated methodology in concrete for evaluating sulfate attack by Na_2SO_4 and $MgSO_4$. **Construction and Building Materials**, v.338, jul, 2023a. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131681.

BREKAILO, Fernanda; PEREIRA, Eduardo; MEDEIROS-JUNIOR, Ronaldo A. Calculation of Sulfate Diffusion Coefficients of Concrete Based on Migration Test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.35, i.11, ago, 2023b. DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-16160.

CASTELLOTE, Marta; ANDRADE, Carmen. ALONSO, María Cruz. Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber: Comparison with natural diffusion tests. **Cement and Concrete Research**, v.31, i.10, p.1411-1420, out, 2001. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00562-2.

HUANG, Qian; WANG, Chong; YANG, Changhui; ZHOU, Limin; YIN, Jiquang. Accelerated sulfate attack on mortars using electrical pulse. **Construction and Building Materials**, v.95, p.875-881, out, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.034.

HUANG, Qian; WANG, Chong; ZENG, Qianpu; YANG, Changhui; LUO, Chaoqun; YANG, Kai. Deterioration of mortars exposed to sulfate attack under electrical field. **Construction and Building Materials**, v.117, p.121-128, ago, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.004.

LI, Chen; JIANG, Zhengwu; MYERS, Rupert, J.; CHEN, Qing. WU, Mengxue. MONTEIRO, Paulo J. M. Understanding the sulfate attack of Portland cement–based materials exposed to applied electric fields: Mineralogical alteration and migration behavior of ionic species. **Cement and Concrete Composites**, v. 111, set, 2019. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103630

LIU, Fang; ZHANG, Tonghuan; LUO, Tao; ZHOU, Mengzhen; ZHANG, Kunkun; MA, Weiwei. Study on the deterioration of concrete under dry-wet cycle and sulfate attack. **Materials**, v.13, i.18, set, 2020. DOI: 10.3390/ma13184095.

LORENTE, Sylvie; YSSORCHE-CUBAYNES, Marie-Pierre; AUGER, Jérome. Sulfate transfer through concrete: Migration and diffusion results. **Cement and Concrete Composites**, v.33, i.7, p.735-741, ago, 2011. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.05.001.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias; BORBA, André Yukio; HOPPE FILHO, Juarez; HELENE, Paulo Roberto Lago. Ensaio de migração de cloretos para concreto: influência do número de fatias extraídas. **Revista Escola de Minas**, vol. 65, n.4, p.475-481, dez, 2012. DOI: 10.1590/S0370-44672012000400007.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. Vol. 4, no. 1. McGraw-Hill, 2006.

MONTENY, Joke; DE BELIE, Nele D.; VINCKE, Elke; VERSTRAETE, Willy Henry; TAERWE, Luc R. Chemical and microbiological tests to simulate sulfuric acid corrosion of polymer-modified concrete. **Cement and Concrete Research**, v.31, i.9, p.1359-1365, set. 2001. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00565-8.

SKALNY, Jan; MARCHAND, Jacques; ODLER, Ivan. **Sulfate attack on concrete**. 1. ed. London: CRC Press, 2019.

UNE 83987. **Determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruro en el hormigón endurecido** – Método multiregimen. Norma Espanõla, 2012.

ZEIDAN, Mohamed; BASSUONI, Mohamed T.; SAID, Aly. Physical salt attack on concrete incorporating nano-silica. **Jounal of Sustainable Cement-Based Materials**, v.6, i.3, p.195-216, jul, 2016. DOI: 10.1080/21650373.2016.1218802.

ZHANG, W. M.; Ba, H. J. Corrosion behaviour of electrode materials in chloride migration test. **Corrosion Engineering, Science and Technology**, v.47, i.6, p.421-424, nov, 2012. DOI: 10.1179/1743278212Y.0000000017.