ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Escória de fluxo de soldagem como material cimentício suplementar

Welding flux slag as a supplementary cementitious material

Roger Peres de Campos
CEFET-MG | Belo Horizonte | Brasil | sgtperes07@gmail.com
Marcio Mateus Pimenta
CEFET-MG | Belo Horizonte | Brasil | marciomateus@cefetmg.br
Janaina Aguiar Park
CEFET-MG e IFMG | Belo Horizonte | Brasil | janaina.park@ifmg.edu.br
Gustavo Filemon Costa Lima
CEFET-MG | Belo Horizonte | Brasil | gustavofcl@cefetmg.br
Claudio Turani Vaz
CEFET-MG | Belo Horizonte | Brasil | claudiovaz@cefetmg.br
Augusto Cesar da Silva Bezerra
CEFET-MG | Belo Horizonte | Brasil | augustobezerra@cefetmg.br

Resumo

A escória de fluxo de soldagem (EFS) é um resíduo da indústria de soldagem por arco submerso que pode causar danos ambientais se não for adequadamente descartado. Considerando as semelhanças entre a EFS e a escória de alto forno, este trabalho tem como objetivo avaliar a possibilidade de reaproveitamento da EFS para substituição parcial do cimento Portland. O cimento com adição de EFS foi analisado por ensaios de resistência à compressão, absorção de água, ataque de ácido sulfúrico, termogravimetria, carbonatação, calorimetria isotérmica e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostram que o cimento composto por 6% de EFS atende aos requisitos de resistência à compressão do cimento CP II-E 40 aos 28 dias e o cimento composto por 35% de EFS atente aos requisitos do CP III 25 aos 28 dias e do CP III 40 aos 91 dias. O aumento do teor de EFS atrasa o início de pega, aumenta a porosidade e reduz a resistência à compressão e a resistência à carbonatação. O reaproveitamento da EFS pela indústria cimentícia pode contribuir para a redução das emissões de CO_2, além de reduzir o risco de contaminação do solo por descarte inadequado da EFS.

Palavras-chave: Escória de fluxo de soldagem. Material cimentício suplementar. Resíduo industrial. Cimento. Descarbonização.

Abstract

Welding flux slag (EFS) is a waste product from the submerged arc welding industry, possessing the potential to inflict environmental harm if inadequately disposed. Considering some similarities between EFS and blast furnace slag, this work aims to evaluate the possibility of reusing EFS as a partial substitute for Portland cement. The cement with EFS was subjected to compressive strength tests, water absorption, sulfuric acid attack, thermogravimetry,

Como citar:
CAMPOS, R. P., PIMENTA, M. M., PARK, J. A., LIMA, G. F. C., VAZ, C. T., BEZERRA, A. C. S. Escória de fluxo de soldagem como material cimentício suplementar. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

carbonation, isothermal calorimetry, and scanning electron microscopy. The results show that the cement composed of 6% EFS meets the compressive strength requirements of CP II-E 40 cement at 28 days and the cement composed of 35% EFS meets the requirements of CP III 25 at 28 days and the CP III 40 to 91 days. Increasing the EFS content delays the onset of setting, increases porosity, and reduces compressive strength and carbonation resistance. The reuse of EFS by the cement industry can contribute to the reduction of CO_2 emissions, in addition to reducing the risk of soil contamination from inadequate disposal of EFS.

Keywords: Welding flux slag. Supplementary cementitious material. Industrial waste. Cement. Decarbonization.

INTRODUÇÃO

A indústria cimenteira é responsável por 5-10% das emissões globais de gases de efeitos estufa [1]. Para a formação do clínquer, principal material do cimento, é necessário o emprego de elevadas temperaturas para que o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) do calcário seja transformado em óxido de cálcio (CaO), liberando CO_2 para a atmosfera. Nesse contexto, a utilização de resíduos industriais para substituição parcial do cimento pode ser uma alternativa para a redução da emissão de gases poluentes, para reciclagem do resíduo e para diminuir o gasto de energia e a extração de recursos naturais não renováveis.

A escória é mundialmente produzida pela indústria siderúrgica e metalúrgica durante a fabricação do ferro gusa, do aço ou na soldagem. A escória de alto-forno (EAF), subproduto da fabricação do ferro gusa, é hoje largamente reaproveitada pela indústria cimenteira graças às suas propriedades cimentantes e pozolânicas [2,3] e por permitir a redução de emissão de gases do efeito estufa [4]. Na Europa, a EAF é o principal constituinte do cimento CEM III/C, podendo atingir até 95% da sua composição [5]. No Brasil, o uso da EAF é normatizado entre 6% e 34% para o cimento CP II-E e entre 35% e 75% para o cimento CP III [6].

A escória de fluxo de soldagem (EFS) é resultante do processo de soldagem por arco submerso, um processo industrial que consiste em unir as peças por meio do calor fornecido por um arco elétrico formado entre um eletrodo e a peça a ser soldada. Todo o processo ocorre embaixo de um material mineral granular, denominado fluxo de soldagem, que protege o metal da contaminação atmosférica e evita os respingos e o ofuscamento da visão, comuns na soldagem tradicional. O fluxo pode ter característica química básica, ácida ou neutra, a depender da quantidade de óxidos ácidos e básicos na sua composição [7]. O resíduo desse processo então, a EFS, varia de acordo com a composição química do fluxo de soldagem, tendo percentuais variáveis de óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de magnésio (MgO), óxido de cálcio (CaO) e óxido de silício (SiO_2) [8].

Não foram encontrados dados atuais da produção estimada de EFS, tendo sido citados valores entre 500 a 750 t/mês entre 2006 e 2010 no Brasil [9], [10]. Devido ao teor de alumínio e cromo elevados, a EFS é classificada como resíduo da classe II A, não inerte, podendo resultar em problemas ambientais significativos quando disposta de maneira inadequada [11]. Os estudos de reaproveitamento da EFS para a construção civil se concentraram em avaliar seu uso em materiais cerâmicos [9], [12], como agregado

miúdo [13], [14], [15], [16] e como agregado graúdo [17], não tendo sido encontrados estudos sobre o reaproveitamento da EFS como material cimentício suplementar.

Neste trabalho foi avaliada a substituição parcial do cimento por escória de fluxo de soldagem nos teores de 6% e 35%. As propriedades mecânicas do cimento composto de EFS foram avaliadas de acordo com as exigências da NBR 16697 [6]. Além disso, foi avaliada a durabilidade do material contra ataques ácidos e a carbonatação tendo como referência o cimento sem adição de EFS.

MATERIAIS E MÉTODOS

MATERIAIS

Foi utilizado cimento padrão tipo V comercial e areia normal brasileira conforme NBR 7214 [18]. A granulometria e a composição química da EFS e do cimento são apresentados nas Tabelas 1 e 2. A Figura 1 apresenta o posicionamento da EFS no diagrama ternário SiO_2 - Al_2O_3 – CaO. De acordo com a classificação de basicidade proposta por [19], essa EFS possui Índice de Basicidade (IB) = 0,95, sendo considerada ácida (IB < 1).

Tabela 1 - Granulometria da EFS e do cimento

Tamanho das partículas (µm)	D_M	D_{10}	D_{50}	D_{90}
EFS	24,07	1,60	14,22	62,81
Cimento	14,19	1,62	11,42	31,23

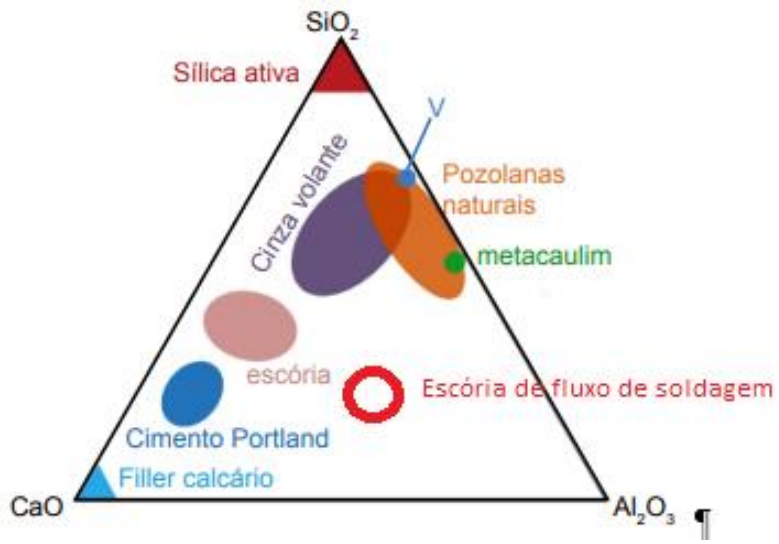
Fonte: os autores

Tabela 2 - Composição química da EFS

(%)	SiO_2	Al_2O_3	MnO	MgO	CaO	Fe_2O_3	K_2O	TiO_2	Na_2O	Outros óxidos	Perda ao fogo
EFS	24,05	23,95	17,25	15,68	9,35	7,12	0,68	0,11	-	1,81	-
Cimento	15,10	10,00	-	-	63,70	4,90	0,90	0,30	0,10	1,80	3,80

Fonte: os autores.

Figura 1 - Posicionamento da EFS no diagrama ternário SiO_2 - Al_2O_3 – CaO



Fonte: adaptado de [20].

MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

As argamassas foram preparadas utilizando o traço 1:3 e relação água/cimento (a/c) = 0,48. Foram preparadas 3 amostras: a primeira com 100% de cimento, denominada Referência; a segunda com substituição de 6% de EFS, denominada EFS 6%; a terceira com substituição de 35% de EFS, denominada EFS 35%. A escolha desses teores de substituição teve como base os percentuais mínimos regulamentados no Brasil atualmente para uso da EAF nos cimentos CP II-E e CP III. A quantidade de materiais utilizada para cada amostra é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantidade de materiais para a confecção dos corpos de prova

Material	Referência	EFS 6%	EFS 35%
Cimento Padrão (g)	624,00	586,55	405,50
Escória de fluxo de soldagem (g)	0	37,45	218,50
Areia grossa (g)	468,00	468,00	468,00
Areia média grossa (g)	468,00	468,00	468,00
Areia média fina (g)	468,00	468,00	468,00
Areia fina (g)	468,00	468,00	468,00
Água (g)	300,00	300,00	300,00

Fonte: os autores.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 5 x 10 cm (diâmetro x altura), que permaneceram em temperatura ambiente com as faces superiores protegidas por vidros durante 24h (Figura 2). Na sequência, foram imersos em solução de água saturada de cal, onde permaneceram até o momento dos ensaios.

Figura 2 - Corpos de prova após moldagem



Fonte: os autores.

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de resistência à compressão seguiram os procedimentos da NBR 7215 [21], com ruptura de 4 corpos de prova de cada amostra aos 28 e 91 dias, utilizando discos de neoprene e o equipamento universal de ensaios da marca Emic, modelo DL30000N. A absorção de água, índice de vazios e massa específica foram determinados de acordo com os procedimentos da NBR 9778 [22], com utilização de 2 corpos de prova de cada amostra. Para o ensaio de ataque de ácido sulfúrico, foram utilizados 2 corpos de prova de cada amostra, imersos por 28 dias em solução de ácido sulfúrico com 5% de

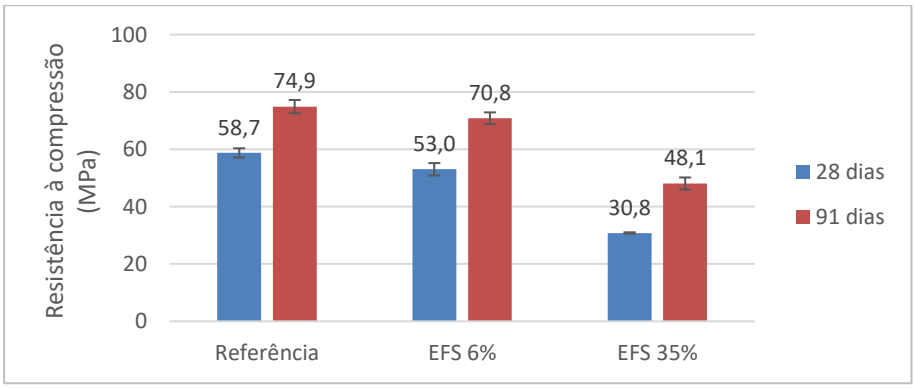
concentração, em massa. Após o período de imersão, os corpos de prova foram lavados em água corrente e esfregados, com auxílio de uma escova comum, para a retirada de todo material degradado. Para o ensaio de calorimetria foram preparadas pastas de cimento com a mesma relação a/c = 0,48 e os mesmos teores de EFS (0%, 6% e 35%) utilizando o equipamento Calmetrix I-CAL 2000 HPC, com temperatura inicial de 23°C e duração do ensaio de 72h. Para a análise termogravimétrica foram aproveitadas as pastas do ensaio de calorimetria, com idade de 28 dias, moídas, utilizando o equipamento Analisador Termogravimétrico Hitachi STA7300, com taxa de aquecimento de 10 ºC/min até atingir 1000 ºC, sob uma vazão de N_2 de 120 mL/min. Para a microscopia eletrônica por varredura (MEV) foram usadas as amostras rompidas no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias, após polimento, utilizando o equipamento Hitachi TM3000. Para o ensaio de carbonatação foram utilizados 2 corpos de prova de cada amostra no equipamento Bass UUC-RH-STD-CO2-200/2018, com temperatura de 30°C, umidade de 65% e teor de CO_2 de 5%, durante 28 dias. Após esse período, os corpos de prova foram abertos por compressão diametral com o auxílio da prensa e submetidos à solução de fenolftaleína.

RESULTADOS

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Figura 3 apresenta as médias e desvios dos resultados de resistência à compressão aos 28 e 91 dias. Observa-se a redução da resistência à compressão com o aumento do teor de EFS. O cimento com 6% de EFS atende à exigência mínima para o cimento CP II-E 40 de resistência à compressão ≥ 40 MPa aos 28 dias e o cimento com 35% de EFS atende à exigência mínima para o cimento CP III 25 de resistência à compressão ≥ 25 MPa (ABNT, 2018). Além disso, o cimento com 35% de EFS atende à determinação facultativa referente a resistência à compressão aos 91 dias para o cimento CP III 40 de resistência à compressão ≥ 48 MPa aos 91 dias. Para o cimento CP II-E não há determinação facultativa para a resistência aos 91 dias.

Figura 3 - Resistência à compressão das amostras aos 28 e 91 dias.



Fonte: os autores.

ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSAS ESPECÍFICAS

A Tabela 4 apresenta a média dos resultados de absorção de água, índice de vazios e massas específicas das amostras. Observa-se que a absorção e água e o índice de vazios

aumentam à medida que o percentual de escória presente na amostra aumenta. Esses resultados corroboram os resultados de resistência à compressão, já que se espera uma tendência de diminuição da resistência à compressão com o aumento da porosidade do material.

Tabela 4 - Absorção de água, índice de vazios e massas específicas.

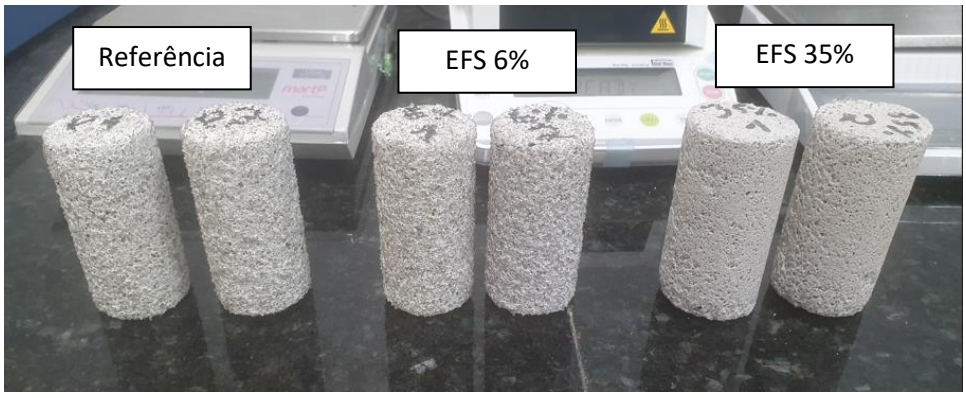
Parâmetros	Referência	EFS 6%	EFS 35%
Absorção (%)	7,57	8,26	9,32
Índice de vazios (%)	16,27	17,56	19,24
Massa específica da amostra seca (g/cm^3)	2,15	2,13	2,06
Massa específica da amostra saturada (g/cm^3)	2,31	2,30	2,26
Massa específica real (g/cm^3)	2,57	2,58	2,56

Fonte: os autores.

ATAQUE DE ÁCIDO SULFÚRICO

A Figura 4 apresenta os corpos de prova após ataque sulfúrico. A análise visual permite concluir que o aumento do teor de EFS contribuiu significativamente para o aumento da resistência ao ataque ácido, com a amostra contendo 35% de EFS tendo sofrido muito menos danos aparentes.

Figura 4 - Corpos de prova após ataque de ácido sulfúrico



Fonte: os autores.

A Tabela 5 apresenta a perda percentual de massa dos corpos de prova após ataque sulfúrico. Os resultados confirmam que o aumento do teor de EFS contribui para a resistência ao ataque ácido, com perda de massa de 0,63% para o cimento com 35% de EFS, contra perda de massa de 9,87% para o cimento puro.

Tabela 5 - Resistência ao ataque de ácido sulfúrico

Parâmetros	Referência		EFS 6%		EFS 35%	
Massa seca antes da degradação (g)	423,57	427,26	424,03	417,82	414,19	410,99
Massa seca depois da degradação (g)	380,42	386,45	381,75	378,51	412,95	407,05
Perda (g)	43,15	40,81	42,28	39,31	1,24	3,94
Perda (%)	10,19	9,55	9,97	9,41	0,30	0,96
Média da perda (%)	9,87		9,69		0,63	

Fonte: os autores.

CALORIMETRIA ISOTÉRMICA

A Figura 5 mostra o fluxo de calor durante a hidratação das primeiras 72h das amostras. O pico inicial (1) é o pico da dissolução do aluminato (C_3A) e do sulfato de

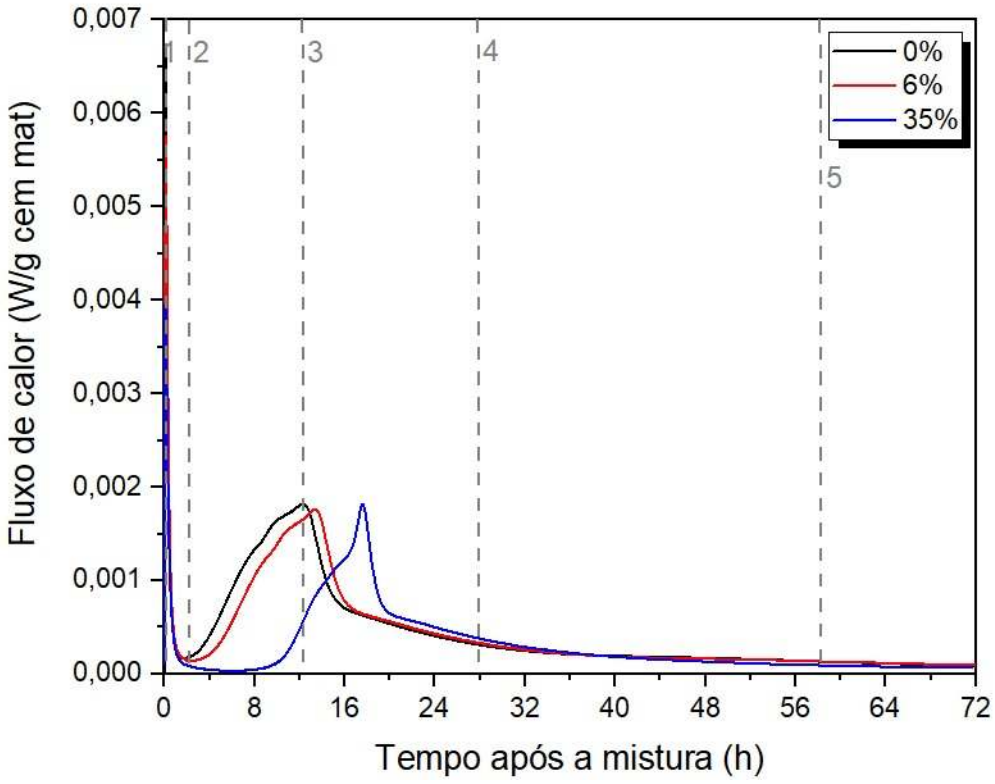
cálcio ($CaSO_4$). O primeiro pico completo (2) mostra a aceleração do fluxo de calor associada à reação do silicato alita (C_3S) [23].

Com relação à pasta de com 6% de EFS, percebe-se, no pico (1), que houve menos reação do C_3A. Percebe-se também, em (2), que houve um ligeiro atraso no início da aceleração do fluxo de calor do C_3S, o que demonstra que o período de dormência (reações lentas de hidratação) foi cerca de 2h maior do que a pasta de referência (CP V puro). O pico do fluxo de calor (3) também sofreu uma defasagem de cerca de 2h em relação à referência.

Ao analisar a curva do da pasta de cimento com 35% de EFS, observa-se que o pico (1) foi ainda menor que o pico da pasta com 6% de EFS. Percebe-se também um período de dormência mais dilatado, em (2), cerca de 8h a mais do que as outras pastas. Logo, o início da pega da pasta com 35% de EFS é bem mais demorado, por volta de 9h após o contato com a água. Além disso, em cerca de 16h após o contato com a água, há um grande fluxo de calor com uma curva bastante acentuada.

A defasagem desses picos associados ao C_3S pode estar relacionada a granulometria da EFS utilizada, haja vista que ela apresentou um diâmetro médio de 24,07 µm, diâmetro esse maior que o diâmetro médio do cimento CP V, que tem por volta dos 15 µm.

Figura 5 - Curvas de fluxo de calor liberado em função do tempo

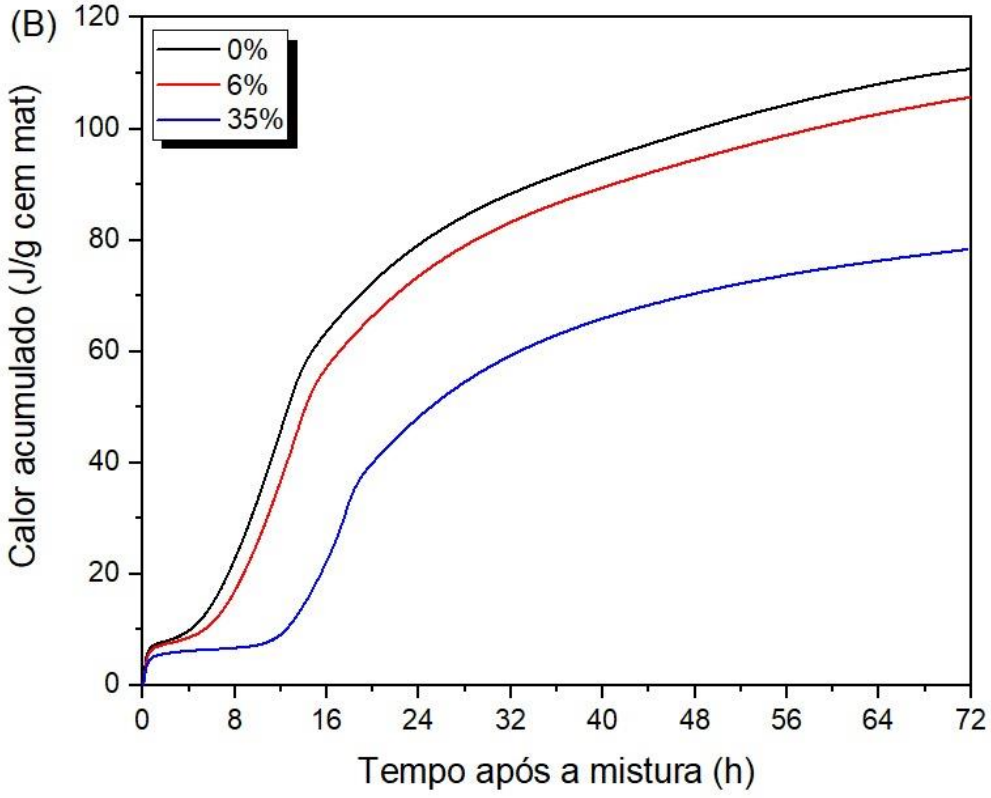


Fonte: os autores.

A Figura 6 apresenta o calor de hidratação acumulado, dado pela integral do fluxo de calor. Percebe-se claramente que o aumento do percentual de EFS reduz o calor acumulado. Isso também pode ser explicado devido à granulometria da escória e ao período maior de dormência antes da reação do C_3S. Esse período maior de dormência

pode estar relacionado com o alto teor de óxido de manganês (MnO) da EFS. Além disso, esse menor calor de hidratação acumulado está vinculado à menor resistência à compressão e ao maior índice de vazios das amostras com EFS.

Figura 6 - Curvas de calor acumulado em função do tempo



Fonte: os autores.

ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

A Figura 7 representa as curvas de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) das amostras analisadas com 28 dias de idade. As curvas mostram quatro perdas significativas de massa: entre 40 ºC e 120 ºC, entre 130 ºC e 150 ºC, entre 400 ºC e 450 ºC e uma perda menor próxima aos 700 ºC. Percebe-se que a curva com 35% de EFS perdeu menos massa em comparação com as outras amostras.

Na primeira região, entre 40 ºC e 120 ºC, local da decomposição da etringita, do gesso (sulfato de cálcio hidratado) e da evaporação da água, a curva de TG da amostra com 35% de EFS já começa a se afastar das demais. Isso pode ser explicado em virtude de haver menos aluminato C_3A e menos sulfato de cálcio ($CaSO_4$), de maneira que o cimento tende a ter menos etringita formada após a hidratação. Logo, haverá menos decomposição de elementos na pasta com menor perda de massa. Já na curva de DTG, a matriz com 6% de EFS perdeu mais massa. Os resultados de absorção de água mostraram que a matriz com 35% de EFS é mais porosa. Porém, não foi verificado qual o formato dos poros, havendo a possibilidade dos poros da matriz com 6% de EFS

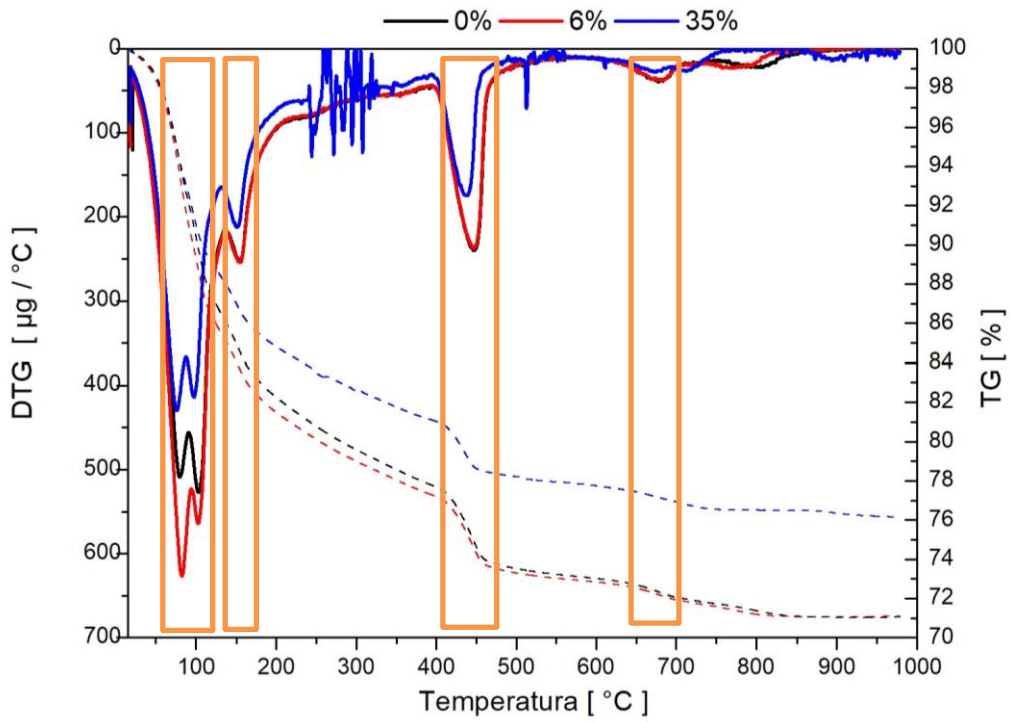
serem maiores mesmo em quantidades menores. Se isso de fato ocorre, naturalmente os poros maiores perderão a água mais facilmente.

Na segunda região, entre 130 ºC e 150 ºC, região de perda de água dos poros capilares do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), a curva DTG da amostra com 35% de EFS mostra que essa matriz perdeu menos água capilar do C-S-H. Isso pode ser resultado de menos C-S-H. Essa afirmação está de acordo com os resultados de resistência à compressão, os quais mostraram que a amostra com 35% de EFS tem menor resistência em virtude de apresentar menos C-S-H, haja vista que esse componente é o principal responsável pela resistência mecânica.

Na terceira região, entre 400 ºC e 450 ºC, local da decomposição do hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), percebe-se que a matriz com 35% de EFS perdeu menos massa que as demais. Isso pode ter ocorrido em virtude de haver menos hidróxido de cálcio na composição dessa amostra, pois a EFS utilizada apresentou-se ácida e com pouco CaO na sua composição química. Logo, pode ter ocorrido reação química de neutralização previamente com alguma quantidade desse hidróxido, reduzindo o pH da matriz. Essa afirmação vai ao encontro do resultado da carbonatação, no qual foi constatado que houve um maior avanço da carbonatação, mostrando que a matriz pode ter sofrido despassivação.

Na quarta região, próximo aos 700 °C, na região da decomposição do carbonato de cálcio ($CaCO_3$), as inclinações das curvas das três amostras são similares, indicando praticamente um mesmo percentual de decomposição.

Figura 7 - Curvas de perda de massa em TG e DTG.

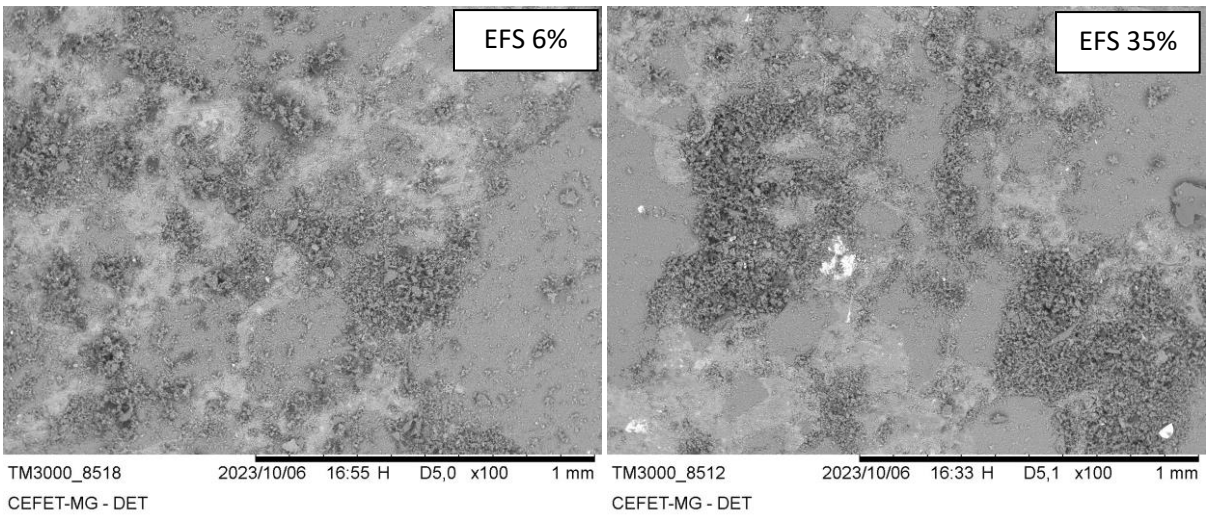


Fonte: os autores.

MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA (MEV)

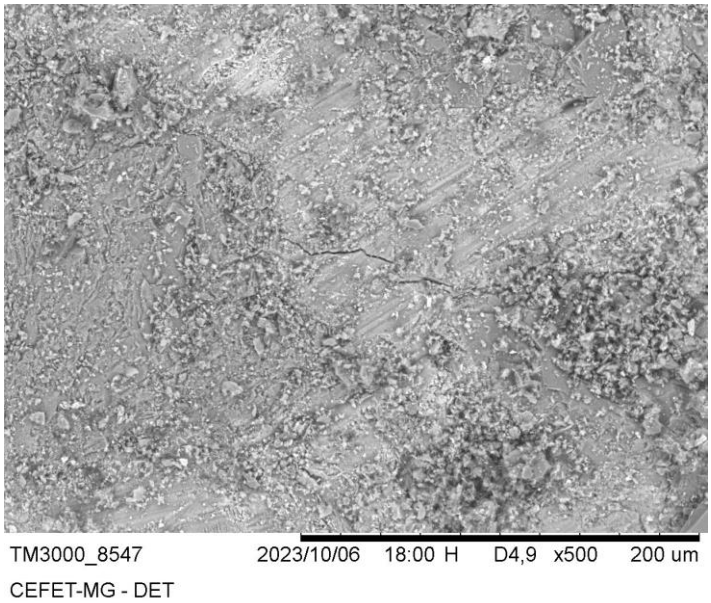
A Figura 8 apresenta imagem de MEV das pastas cimento com 6 e 35% de EFS com 51 dias de cura, nas quais observa-se que as matrizes apresentaram compactação e coesão. A Figura 9 apresenta um detalhe de trinca observado na pasta com 6% de EFS.

Figura 8 - MEV das pastas de cimento com 6 e 35 % de EFS.



Fonte: os autores.

Figura 9 - MEV da pasta de cimento com 6% de EFS – detalhe de trinca.



Fonte: os autores.

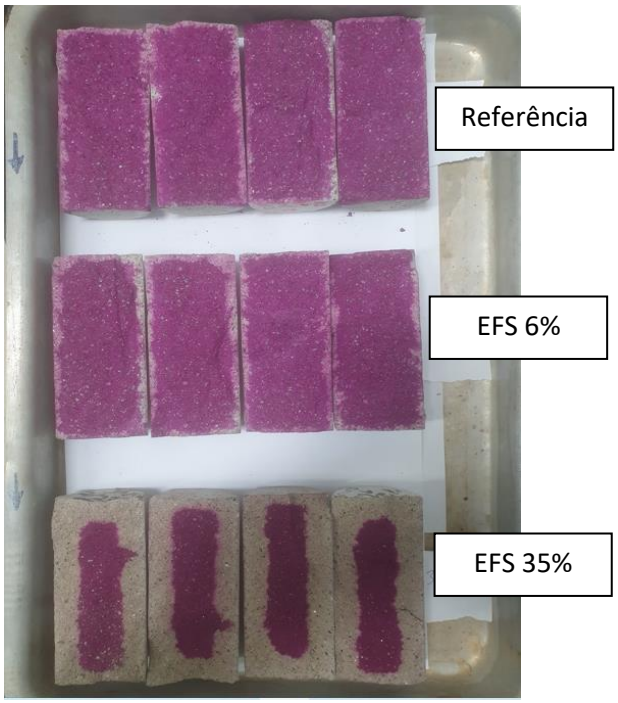
CARBONATAÇÃO

Analisando a Figura 10 é visivelmente perceptível que os corpos de prova com 35% de EFS sofreram mais carbonatação, em comparação com as outras matrizes. A carbonatação avançou quase 2cm, o que seria muito prejudicial à armadura de um concreto armado, haja vista que o cobrimento do concreto armado deve ser, no mínimo, de 2,5cm. Isso pode ser explicado pelo maior índice de vazios desse material

e ao fato do pH da matriz ter reduzido a medida que a escória, ácida, foi adicionada em sua composição, resultando na despassivação da matriz.

As amostras com 6% de EFS apresentaram um avanço praticamente irrelevante da carbonatação em comparação com a amostra sem escória. Isso demonstra que esse percentual de substituição de EFS não prejudicaria o concreto armado no quesito carbonatação.

Figura 10 - Corpos de prova carbonatados após aspersão de fenolftaleína



Fonte: os autores.

CONCLUSÃO

Este trabalho teve a finalidade de verificar se é viável a substituição parcial do cimento por EFS, nos percentuais de 6% e 35%, do mesmo modo que a EAF substitui parcialmente o cimento na composição dos cimentos CP II-E e CP III.

Os resultados mostraram que a substituição de 6% de EFS garante um cimento com resistência compatível ao CP II-E 40 aos 28 dias, com boa resistência à carbonatação e ao ataque por ácido sulfúrico. A matriz apresenta coesão e compactação, com poucas trincas. Em relação à amostra de referência (cimento puro), apresentou taxa de liberação de calor aproximadamente 2h atrasada e perda de massa um pouco inferior até 150 ºC.

A substituição de 35% de EFS garante um cimento com resistência compatível ao CP III 25 aos 28 dias e compatível ao CP III 40 aos 91 dias. O aumento do teor de EFS trouxe melhorias na resistência ao ataque por sulfúrico, porém provocou aumento da absorção de água e redução drástica da resistência à carbonatação. Essa redução pode estar associada à composição ácida da EFS, o que reduz o pH da pasta e provoca despassivação da matriz. Em relação à amostra de referência, a pasta com 35% de EFS

apresentou taxa de liberação de calor aproximadamente 8h atrasada e perda de massa inferior até 450 ºC, o que indica menor quantidade de C-S-H, o principal componente do cimento responsável pelo ganho de resistência. Esses resultados podem estar relacionados à granulometria da EFS (um pouco maior do que o cimento puro), ao seu teor de MnO mais elevado e teor de CaO mais baixo.

Portanto, conclui-se que a substituição de EFS no cimento pode ser viável, tendo sido comprovados resultados satisfatórios para a substituição de 6%. Essa substituição permite a diminuição do acúmulo de EFS na natureza, além de reduzir a extração de recursos naturais, gasto de energia e emissão de gases poluentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por seu apoio para participação no evento e com infraestrutura de equipamentos [Convênio: PCE-00405-24, APQ-01425-22 e RED-00191-23], e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo de produtividade em pesquisa [Convênio: PQ 316846/2023-6], bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

[1] A. Talaei, D. Pier, A. V. Iyer, M. Ahiduzzaman, e A. Kumar, “Assessment of long-term energy efficiency improvement and greenhouse gas emissions mitigation options for the cement industry”, *Energy*, vol. 170, p. 1051–1066, mar. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.088.

[2] E. Özbay, M. Erdemir, e H. I. Durmuş, “Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties - A review”, *Constr Build Mater*, vol. 105, p. 423–434, fev. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153.

[3] M. Oge, D. Ozkan, M. Bahattin Celik, M. Sabri Gok, e A. C. Karaoglanli, “ScienceDirect An Overview of Utilization of Blast Furnace and Steelmaking Slag in Various Applications”, 2019. [Online]. Disponível em: www.sciencedirect.com

[4] E. Crossin, “The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute”, *J Clean Prod*, vol. 95, p. 101–108, maio 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.02.082.

[5] European Committee for Standardization, “EN 197-1: Cement-Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements”, 2011. [Online]. Disponível em: www.mbsmw.org

[6] ABNT, “NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos”, Rio de Janeiro, 2018. [Online]. Disponível em: www.abnt.org.br

[7] J. Zhang, G. Shao, J. Fan, L. Wang, e D. Zhang, “A Review on Parallel Development of Flux Design and Thermodynamics Subject to Submerged Arc Welding”, *Processes*, vol. 10, nº 11, nov. 2022, doi: 10.3390/pr10112305.

[8] R. Annoni, P. S. Souza, M. B. Mansur, A. Miskufová, e T. Havlik, “Caracterização de escórias de soldagem a arco submerso”, em *XXIV ENTMME*, Salvador, 2011.

[9] G. F. Morete, R. P. R. Paranhos, e J. N. F. Holanda, “Avaliação de Algumas Propriedades Físico-Mecânicas de Corpos Cerâmicos Incorporados com Resíduo de Escória de Soldagem”, *Matéria*, vol. 11, nº 3, p. 232–237, 2006, [Online]. Disponível em: http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10806

[10] C. E. Viana, D. P. Dias, R. P. R. Paranhos, e J. N. F. Holanda, “Influência da incorporação de resíduo de escória de fluxo de soldagem nas propriedades tecnológicas de argamassa de múltiplo uso e cerâmica vermelha para construção civil”, *Cerâmica*, vol. 56, p. 83–90, 2010.

[11] C. E. Viana, “Escória de fluxo de soldagem como agregado miúdo para a produção de argamassa de múltiplo uso”, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2007.

[12] F. B. Siqueira, M. C. Amaral, R. A. Bou-Issa, e J. N. F. Holanda, “Influence of industrial solid waste addition on properties of soil-cement bricks”, *Ceramica*, vol. 62, nº 363, p. 237–241, jul. 2016, doi: 10.1590/0366-69132016623631969.

[13] R. Bavithra e G. Suruthi, “Experimental study on behaviour of concrete by using welding slag as a partial replacement of sand”, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 6, nº 14, p. 1–3, 2018, [Online]. Disponível em: www.ijert.org

[14] N. Bhuvaneswari e K. Nirmalkumar, “Experimental Study on the Mechanical Strength Properties of Steel Slag in Concrete and Weld Slag in Concrete”, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2008, [Online]. Disponível em: www.irjet.net

[15] C. E. Viana, D. P. Dias, J. N. F. de Holanda, e R. P. da R. Paranhos, “The Use of Submerged-Arc Welding Flux Slag as Raw Material for the Fabrication of Multiple-Use Mortars and Bricks”, *Soldagem Insp.*, vol. 14, nº 3, p. 257–262, 2009.

[16] Y. P. A. Rumbyarso, “Analysis of compressive strength of concrete by using slag circum as a concrete aggregate mix”, *Multiscience*, vol. 2, nº 12, p. 1–12, mar. 2022.

[17] A. Vijayakumar, J. R. Murugadoss, e C. Bharathi, “Ecological concrete - a review”, *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, vol. 8, nº 6, p. 160–170, 2017, [Online]. Disponível em: http://www.iaeme.com/IJCIET/index.asp161

[18] ABNT, “NBR 7214 - Areia normal para ensaio de cimento - Especificação”, Rio de Janeiro, 2015. [Online]. Disponível em: www.abnt.org.br

[19] C. Fortes, “Apostila de Arco Submerso”, Contagem, 2004.

[20] R. A. Rojas-Ramírez, M. H. Maciel, R. C. O. Romano, R. G. Pileggi, e A. C. V. Coelho, “Impact of the use of vermiculite residue in the hardened properties of

mortar", *Ceramica*, vol. 65, nº 373, p. 107–116, jan. 2019, doi: 10.1590/0366-69132019653732510.

[21] ABNT, "NBR 7215 - Cimento Portland-Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos", Rio de Janeiro, 2019. [Online]. Disponível em: www.abnt.org.br

[22] ABNT, "NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica", Rio de Janeiro, 2009. [Online]. Disponível em: www.abnt.org.br

[23] L. Frølich, L. Wadsö, e P. Sandberg, "Using isothermal calorimetry to predict one day mortar strengths", *Cem Concr Res*, vol. 88, p. 108–113, out. 2016, doi: 10.1016/j.cemconres.2016.06.009.