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

Cimentos Portland com Elevada Adição de Escória Granulada de Alto Forno

Portland Cements with High Addition of Granulated Blast Furnace Slag.

Isabella Oliveira Pereira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG |Belo Horizonte | Brasil | isabellaopereira@hotmail.com
Maysa Lorena Figueiredo Martins
Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP | Ouro Preto| Brasil | maysa.lfm@gmail.com
Augusto Cesar da Silva Bezerra
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG | Belo Horizonte | Brasil | augustobezerra@cefetmg.br

Resumo

O estudo investigou o desempenho mecânico e as propriedades funcionais de cimentos Portland modificados com diferentes teores de substituição de escória granulada de alto forno (EGAF) e foi avaliada sua durabilidade em condições específicas. A caracterização dos materiais foi realizada e verificou-se que a EGAF é básica composta por material amorfo, vítreo e reativo. As substituições de EGAF em relação ao Cimento Portland convencional foram de 70%, 80% e 90%, superando os limites estabelecidos pela norma NBR 16697/2018. A durabilidade foi avaliada por meio de testes de ataque ácido e absorção de água. A formação dos produtos de hidratação foi avaliada pelo ensaio de calorimetria. A presença de EGAF em proporções elevadas provocou o retardamento do desgaste superficial das amostras e aumentou a absorção de água sem comprometer a durabilidade do material. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias revelaram valores próximos a 50 MPa. A amostra que se destacou foi a com 80% de EGAF e atendeu aos padrões estabelecidos pela NBR 16697/2018, indicando um potencial promissor para sua aplicação em diversas áreas da construção civil.

Palavras-chave: Cimento Portland, Escória granulada de alto forno (EGAF), Desempenho mecânico, Propriedades funcionais, Durabilidade, Substituição de materiais

Abstract

The study investigated the mechanical performance and functional properties of Portland cements modified with different levels of substitution of granulated blast furnace slag (GBFS), evaluating their durability under specific conditions. The materials were characterized, revealing that GBFS is a basic solution composed of amorphous, vitreous, and reactive material. Substitutions of GBFS in relation to conventional Portland Cement were 70%, 80%, and 90%, exceeding the limits established by standard NBR 16697/2018. Durability was assessed through

Como citar:
PEREIRA, I., O., MARTINS, M. L. F., BEZERRA, A. C.S. Cimentos Portland com Elevada Adição de Escória Granulada de Alto Forno. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

acid attack tests and water absorption. The formation of hydration products was evaluated by calorimetry assay. The presence of GBFS in high proportions delayed the surface wear of the samples and increased water absorption without compromising material durability. The results of compressive strength tests at 28 days revealed values close to 50 MPa. The sample that stood out was the one with 80% GBFS, meeting the standards established by NBR 16697/2018, indicating promising potential for its application in various areas of the construction industry.

Keywords: Portland Cement, Granulated Blast Furnace Slag (GBFS), Mechanical Performance, Functional Properties, Durability, Material Substitution

INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico, ou seja, um material que reage com a água, endurece ao ar e mantém elevadas resistências mesmo em contato subsequente com a água [1–3]. Este material é produzido a partir da pulverização de clínquer e é constituído principalmente por silicatos de cálcio hidráulicos, além de conter uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio [2].

O cimento Portland pode ser caracterizado conforme o desempenho mecânico e suas funcionalidades, sendo classificado de acordo com as adições e propriedades especiais. Ele é identificado por siglas seguidas da respectiva classe de resistência (25, 32, 40 ou ARI) e acrescido dos sufixos RS (Resistente a Sulfatos) e BC (Baixo Calor de Hidratação) [3]. A NBR 16697 (2018) tem como objetivo unificar, especificar e modificar alguns parâmetros relativos aos requisitos necessários para a produção do Cimento Portland. Esta norma regulamentadora alterou alguns limites de composição para o Cimento Portland. O objetivo alinhar-se aos padrões normativos internacionais e atende às diretrizes da Agência Internacional de Energia (IEA) e da Iniciativa pela Sustentabilidade do Cimento (CSI), que incentivam a adoção de alternativas e tecnologias mais avançadas para reduzir as emissões específicas de CO_2 por tonelada de cimento.

Além das modificações na composição, a NBR 16697 (2018) trouxe avanços em sustentabilidade e eficiência energética. O aumento no teor de materiais suplementares, como escórias de alto-forno e pozolanas, não só contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa substituindo parcialmente o clínquer, mas também diminui o consumo de recursos naturais e a energia necessária para a produção do cimento [4,5].

Este estudo visa analisar o comportamento mecânico e a durabilidade de argamassas produzidas com teores de substituição de escória superiores aos especificados pela NBR 16697 (2018). A pesquisa verificou se a utilização de maiores quantidades de escória pode oferecer uma alternativa viável para a construção civil, mantendo a qualidade do material enquanto promove práticas mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis.

METODOLOGIA

A avaliação da utilização da ESGAF (Escória Granulada de Alto Forno) como substituição parcial ao cimento Portland (CPV) teve como base a composição do CPV, que consiste em 95-100% de clínquer com adição de sulfato de cálcio. Ao substituir parcialmente o CPV pela ESGAF, obtém-se um material similar ao cimento Portland

composto tipo CPII-F, que é constituído por 75-89% de clínquer e 11-25% de material carbonático. Devido à semelhança da composição do material resultante com o CPII-F, este foi utilizado como referência para os ensaios realizados.A escória granulada de alto-forno utilizada foi fornecida pela indústria cimenteira. O material foi recebido seco e moído, apresentando homogeneidade, granulometria consistente e coloração branca. A caracterização da escória e dos corpos de prova foi realizada por meio de análise visual, granulometria a laser, microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectrometria de fluorescência de raios X por energia dispersiva (FRX), difração de raios X (DRX) e calorimetria.

A análise granulométrica foi realizada pelo equipamento Cilas 1090 Laser Particle Analyser, que fornece uma análise detalhada da distribuição granulométrica e do diâmetro médio das partículas da amostra de EGAF. A caracterização morfológica da EGAF foi realizada com o microscópio eletrônico de varredura de baixo vácuo Hitachi TM 3000. Para a análise das características químicas dos materiais, utilizou-se a espectrometria de fluorescência de raios X por energia dispersiva (FRX), com o equipamento Shimadzu FRX–720. O ensaio de difração de raios X (DRX) foi conduzido com o difratômetro Shimadzu XRD–7000, visando a identificação dos constituintes cristalinos da amostra de EGAF. O ensaio de calorimetria foi conduzido utilizando o Calorímetro Calorimetrix CAL 2000 HPC, que é capaz de medir a quantidade de calor liberada durante o processo.

Para avaliar o comportamento da escória foram moldados corpos de prova com 0%, 70%, 80% e 90% de substituição do cimento Portland. A proporção da argamassa utilizada foi de 1:3 (cimento: agregado miúdo) com uma relação água/cimento (A/C) de 0,48. Os corpos de prova, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, foram preparados e armazenados seguindo as diretrizes da NBR 7215/2019 [6]. E utilizados para as análises do comportamento mecânico da argamassa, absorção de água e resistência ao ataque ácido.

Foi necessário a preparação de pequenas quantidades de pasta de cimento para os ensaios de caracterização microestrutural, conforme especificado na Tabela 1. Ao contrário da argamassa, a pasta é composta exclusivamente de cimento e água, sem agregados. A formulação da pasta foi ajustada para otimizar a realização do ensaio de calorimetria.

Tabela 1 - Proporções utilizadas para confecção da pasta cimento no ensaio de calorimetria

AMOSTRA	Cimento (g)	Escória Granulada de alto forno (g)	Água (g)
REFERÊNCIA (CP II - F)	30	-	14,42
70% de Substituição	9	21	14,42
80% de Substituição	6	24	14,42
90% de Substituição	3	27	14,42

Fonte: Autor.

O ensaio de resistência à compressão, seguindo a norma NBR 7215 [6], permitiu avaliar o comportamento mecânico das amostras sob compressão até a ruptura. Foram ensaiados cinco corpos de prova para cada proporção aos 7 e 28 dias de cura.

Para o ensaio de absorção de água por imersão, conforme a norma NBR 9778/2005 [7], as amostras foram submetidas aos seguintes passos: inicialmente, foram imersas em água a uma temperatura de (23±2)°C por 72 horas para permitir a absorção máxima de água. Após o período de saturação, as amostras foram retiradas da água e pesadas imediatamente submersas, em seguida, pesadas úmidas (após remover qualquer água superficial com um pano) e, por fim, pesadas após serem completamente secas em uma estufa a uma temperatura de (105±5)°C por um período de 72 horas. Essas pesagens foram realizadas para determinar a quantidade de água absorvida pelas amostras em diferentes condições aos 28 dias de cura.

O ensaio de ataque ácido seguiu as metodologias descritas em [1,8]. Dois corpos de prova com 28 dias foram submetidos ao seguinte procedimento: foram secos e, em seguida, imersos em duas soluções de ácido sulfúrico, uma com concentração de 5% e outra com 2,5% v/v, por um período de 7 dias cada. Após cada imersão, os corpos de prova foram lavados, escovados, secos novamente e pesados para análise da perda de massa. Este experimento tem como objetivo avaliar a desestabilização das fases hidratadas e, consequentemente, a perda de massa.

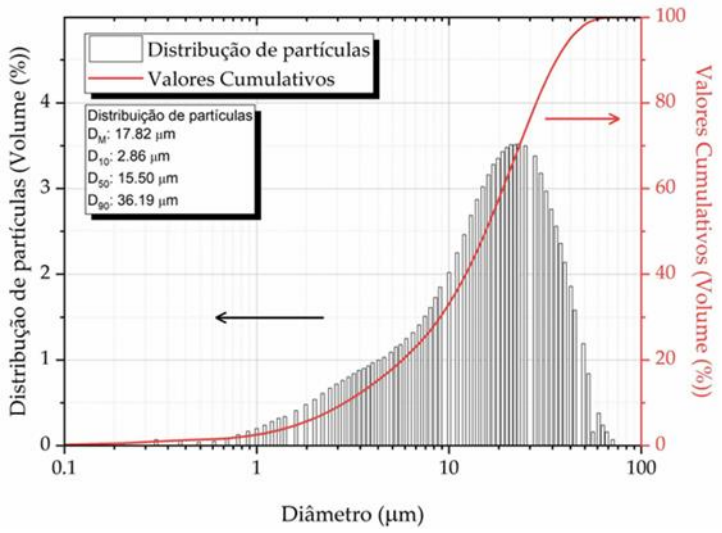
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise da Escória Branca Granulada de Alto Forno: Resultados da Caracterização

Granulometria

A análise granulométrica a laser da EGAF (Figura1) revelou um diâmetro médio de 17,82 µm e D90 de 36,16 µm, indicando uma distribuição granulométrica relativamente uniforme e finamente moída. Essa finura sugere que a EGAF é adequada para reações pozolânicas, contribuindo para a formação de produtos de hidratação que melhoram a microestrutura e as propriedades mecânicas e de durabilidade do cimento [8].

Figura 1 - Curva granulométrica EGAF



Fonte: Autor

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

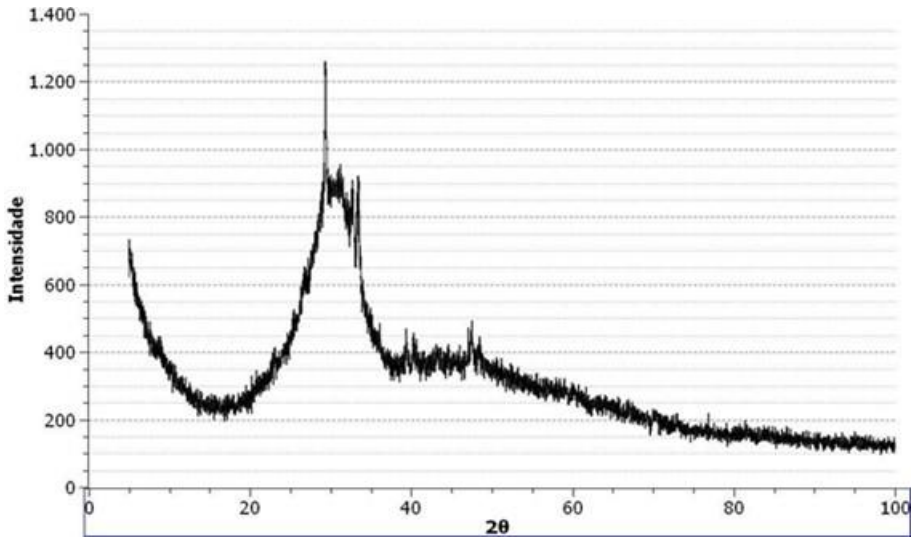
Os principais componentes da EGAF são óxido de cálcio (CaO), dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de magnésio (MgO). A relação entre esses compostos valida a eficiência da EGAF em adição ao cimento.

Os principais óxidos presentes na composição da escória granulada de alto-forno (EGAF) são o óxido de cálcio (CaO) e o dióxido de silício (SiO_2), que compõem 60,56% e 25,73% da composição, respectivamente. O CaO pode influenciar na hidratação do cimento, contribuindo para a formação de compostos de hidróxido de cálcio, que conferem resistência e durabilidade ao concreto [9–11]. A presença dos outros óxidos como Al_2O_3 (6,88%) e MgO (2,25%), na EGAF podem vir a influenciar positivamente as propriedades do cimento. O Al_2O_3, por exemplo, pode contribuir para a formação de compostos de alumínio que melhoram e aumentam a durabilidade da argamassa[12–14].

CRISTALOGRAFIA

O gráfico da Figura 2 apresenta o difratograma da escória granulada de alto-forno obtido por difração de raios X. Observou-se poucos picos, indicando uma quantidade reduzida de materiais cristalinos. A presença significativa de fase amorfa na EGAF é destacada, o que é interessante, pois fases amorfas são geralmente mais reativas devido à sua estrutura desordenada e alta energia interna, facilitando a participação em reações químicas [15–17].

Figura 2 - Difratograma da escória granulada de alto forno

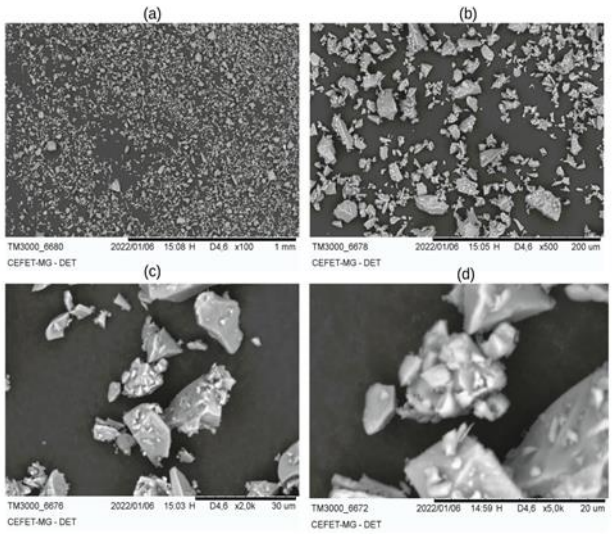


Fonte: Autor.

MICROSCOPIA ELETRÔNICA DA EGAF

Na Figura 3 observa-se que os grãos da escória apresentam diferentes granulometrias, formas irregulares, texturas indefinidas e partículas aglomeradas.

Figura 3 - Microscopia eletrônica por varredura da EGAF. (a) resolução x100, (b) resolução x500, (c) resolução x2.0K e (d) resolução de 5.0K.



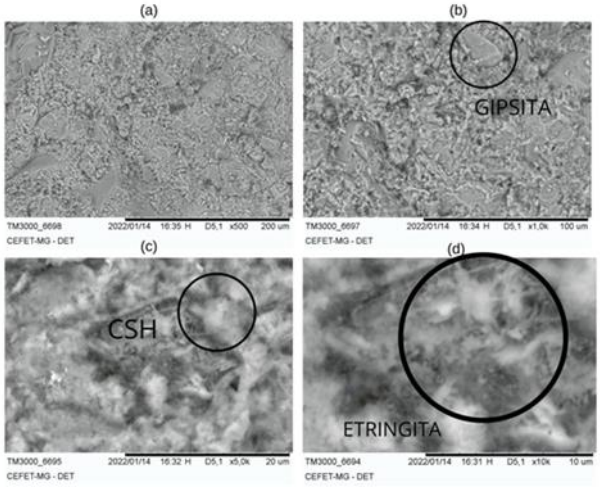
Fonte: Autor.

Características e Desempenho de Cimento com Elevado Teor de Escória Granulada de Alto Forno

Microscopia eletrônica do cimento com adição

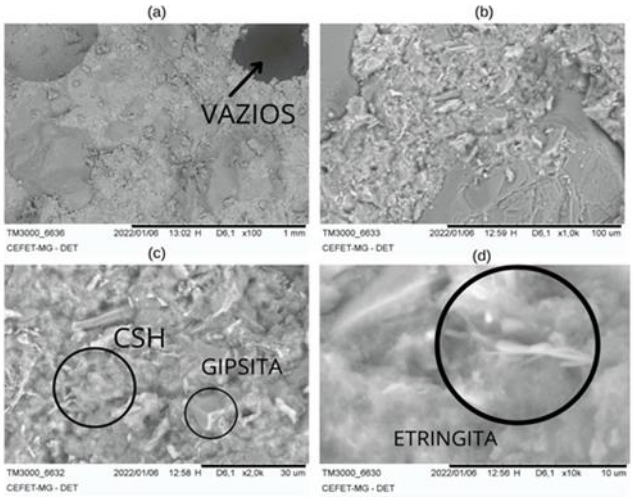
As Figuras 4 e 5 apresentam a microscopia eletrônica das amostras de referência e das amostras com 70% de substituição de EGAF, respectivamente. Nas imagens, observou-se uma maior presença de CSH (hidrato de silicato de cálcio) [18], bem como pontos de gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) e etringita ($C3A \cdot {}_3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) [19]. Esses componentes são típicos do processo de hidratação do concreto, onde o sulfato de cálcio é adicionado na forma de gipsita, e a etringita é um dos principais produtos formados durante essa hidratação.

Figura 4 - Microscopia eletrônica por varredura amostra ref. (a) resolução x500, (b) resolução x1,0K, (c) resolução x5.0K e (d) resolução de 10.0K.



Fonte: Autor.

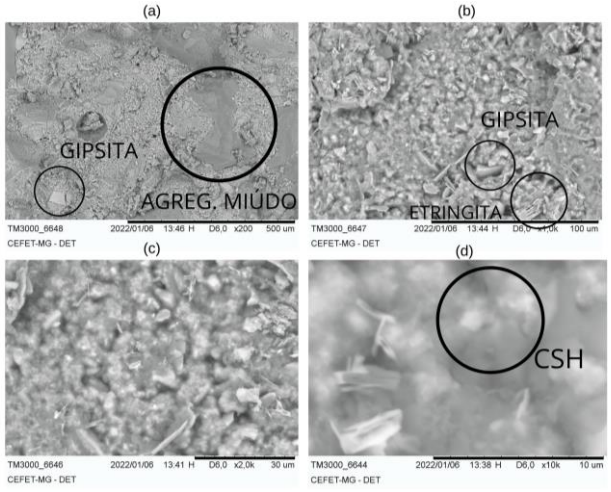
Figura 5 - Microscopia eletrônica por varredura amostra com 70% de sub. (a) resolução x100, (b) resolução x1,0K, (c) resolução x2.0K e (d) resolução de 10.0K.



Fonte: Autor.

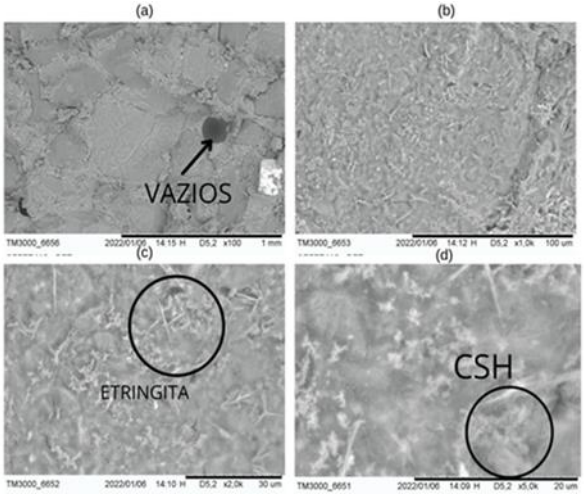
A Figura 6 e 7 mostram a microscopia eletrônica por varredura realizada na amostra com 80 e 90% de substituição respectivamente. Observou-se maior presença de espaços vazios e menor presença de etringita.

Figura 6 - Microscopia eletrônica por varredura amostra com 80% de sub. (a) resolução x100, (b) resolução x1,0K, (c) resolução x2.0K e (d) resolução de 10.0K.



Fonte: Autor.

Figura 7 - Microscopia eletrônica por varredura amostra com 90% de substituição. (a) resolução x100, (b) resolução x1,0K, (c) resolução x2.0K e (d) resolução de 5.0K.



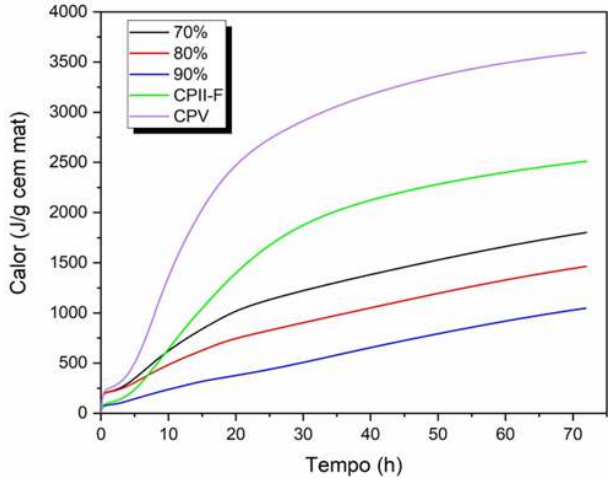
Fonte: Autor.

A avaliação microestrutural possibilitou investigar as mudanças ocasionadas pela adição de escória granulada de alto forno (EGAF). A análise sugere que as amostras com maiores teores de EGAF são mais homogêneas, apresentam menores incidências de etringita e ausência de monossulfatos hidratados. Essas variações estruturais são favoráveis para a melhoria da durabilidade do concreto.

CALORIMETRIA

A Figura 8 exibe as curvas de liberação de calor acumulado para todas as amostras durante as 72 horas de teste. Observou-se uma maior liberação de calor nas amostras de CPV e CPII-F. Além disso, constatou-se que a presença de maiores teores de escória granulada de alto forno como substituinte influenciou na redução da perda de calor e, consequentemente, na cinética de hidratação.

Figura 8 - Ensaio de Calorimetria - Calor x Tempo

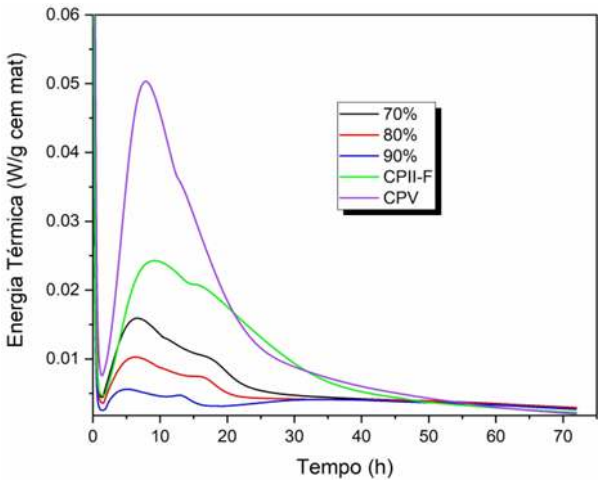


Fonte: Autor

Na Figura 8 é apresentada a relação entre energia térmica e tempo. Observou-se que todas as amostras exibiram períodos de indução próximos, resultando em valores

semelhantes para o início do processo de pega, ocorrendo em todas as amostras nas primeiras 5 horas do ensaio. É importante notar que o cimento CPV demonstrou uma maior liberação de energia térmica, enquanto o aumento dos teores de EGAF como substituto resultou em uma diminuição na liberação de energia.

Figura 9 - Ensaio de Calorimetria - Energia térmica x Tempo

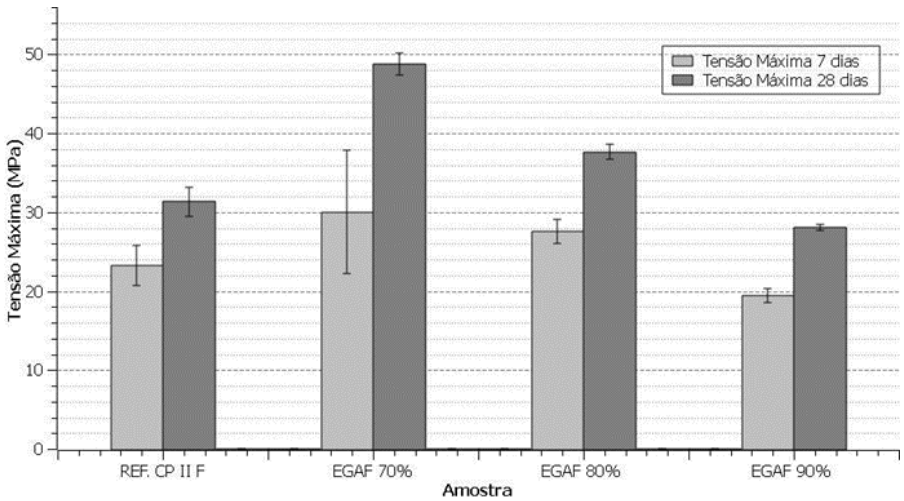


Fonte: Autor.

DESEMPENHO MECÂNICO

É perceptível uma tendência de redução na resistência à compressão à medida que ocorre o aumento da adição de EGAF, conforme demonstrado na Figura 10. No entanto, as amostras com 70% e 80% de substituição obtiveram resistências de 48,78 MPa e 37,64 MPa, respectivamente. Esses valores superam os limites mínimos estabelecidos pelas normas técnicas da ABNT (NBR16697) [3] para o Cimento Portland de referência, CPII-F32. A amostra com 90% de substituição alcançou um resultado máximo de 28,02 MPa, inferior ao referencial, mas com potencial para substituir outros tipos de cimento, como o CPII-F25.

Figura 10 - Resultados ensaio de Compressão



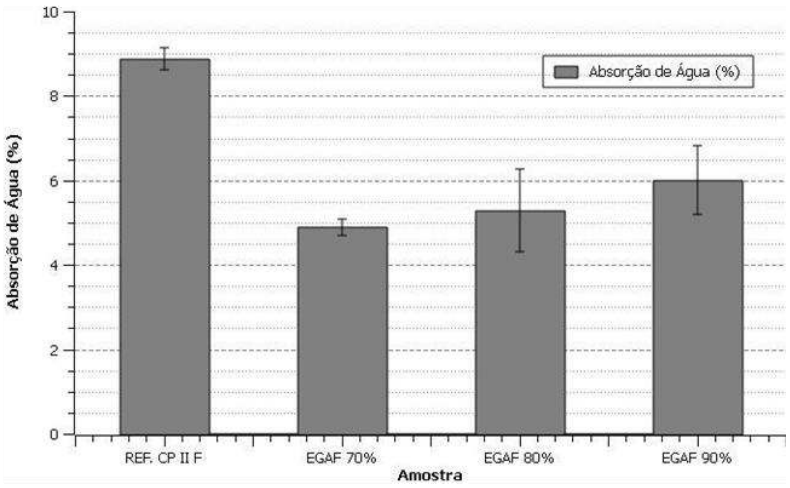
Fonte: Autor.

ABSORÇÃO DE ÁGUA

Na análise de absorção de água (Figura 11) foi observado que a presença significativa de EGAF influencia no aumento do índice de vazios das amostras com maiores teores de substituição. Isso resulta em uma redução da massa específica do material. No entanto, ao compararmos com a amostra referencial CPII-F, todas as amostras demonstraram melhorias na absorção de água.

Ao avaliar os parâmetros de durabilidade, o ensaio de absorção de água por imersão revelou um aumento na absorção de água conforme o teor de EGAF aumentava nas amostras. Contudo, a absorção de água para todas as amostras permaneceu abaixo de 10%, e não foram observadas variações significativas nos resultados. Portanto, os resultados obtidos nesta pesquisa sugerem que as características encontradas são determinantes para a durabilidade do concreto.

Figura 11 - Absorção de água das amostras



Fonte: Autor.

Conforme NEVILLE 2011 [20] mostra em seus estudos, a absorção de água em concretos inferiores a 10% é considerada uma condição crítica para garantir a durabilidade estrutural a longo prazo. Essa característica está intimamente ligada à porosidade do material, onde uma baixa absorção indica uma menor quantidade de vazios capazes de reter água, resultando em uma maior resistência à penetração de agentes agressivos e, consequentemente, em uma maior vida útil da estrutura. Nesse contexto, as amostras analisadas neste estudo, com os respectivos teores de substituição de EGAF, demonstraram atender a esse requisito fundamental de durabilidade, sugerindo um potencial promissor para sua aplicação em aplicações estruturais.

ATAQUE ÁCIDO

A influência da escória de alto-forno na resistência ao ataque por ácido sulfúrico foi avaliada por meio da perda de massa dos corpos de prova. Com o objetivo de avaliar a durabilidade desse compósito, realizou-se o ensaio de ataque ácido, esperando-se que as amostras com maior teor de substituição de EGAF demonstrassem um

desempenho superior. Devido ao baixo ou nulo teor de hidróxido de cálcio na EGAF, devido ao seu consumo durante o processo de hidratação, espera-se uma interação reduzida com o ácido. Através da avaliação visual registrada na Figura 12, observa-se que as amostras com maiores teores de EGAF estão visualmente mais preservadas.

Figura 12 - Amostras após ataque ácido

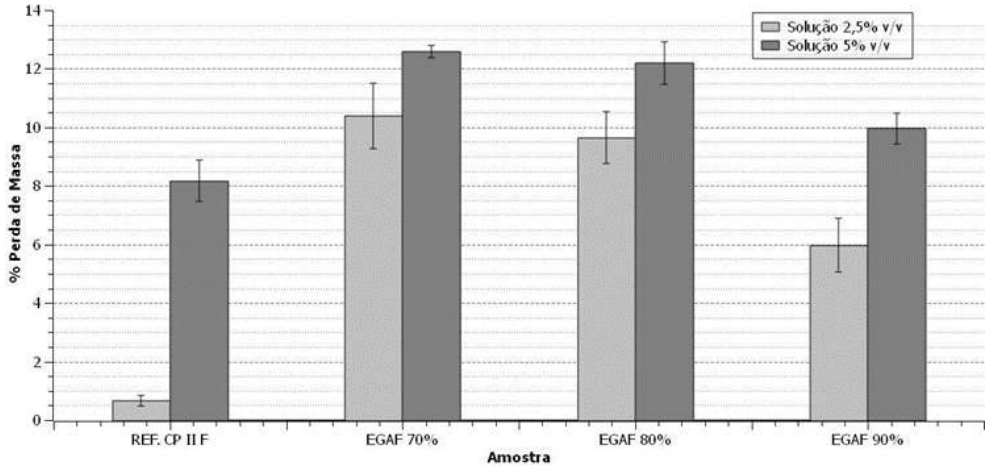


Fonte: Autor.

Após a análise comparativa dos resultados, foram gerados os dados plotados no gráfico da Figura 13, representando a perda de massa de cada amostra após o ataque de ácido sulfúrico. Essa análise sugere que a presença de EGAF tem um efeito protetor externo, retardando apenas o desgaste superficial das amostras.

Conforme descrito anteriormente o $Ca(OH)_2$ presente na matriz do cimento desempenha um papel crucial como ativador durante a hidratação da EGAF. Durante esse processo, o $Ca(OH)_2$ é consumido, resultando em uma redução de seu teor dentro do material à base de cimento. Essa diminuição contribui para uma menor deterioração externa do material com maiores teores de EGAF quando exposto ao ataque ácido, apesar da diminuição da massa ser maior quando comparada à referência.

Figura 13 - Perda de massa por ataque de ácido sulfúrico



Fonte: Autor.

CONCLUSÃO

A substituição do Cimento Portland por Escória Granulada de Alto Forno (EGAF) em proporções significativas apresentou resultados satisfatórios para diversas propriedades do concreto. Os resultados do FRX indicaram a presença predominante dos elementos principais da EGAF, validando sua eficácia como substituto mineral ao cimento. A análise do DRX revelou uma forma predominantemente amorfa, vítrea e reativa ao contato com a água, sugerindo sua adequação para tal aplicação.

A análise do MEV indicou que amostras com maiores teores de EGAF apresentaram maior homogeneidade, menor incidência de etringita e ausência de monosulfatos hidratados, características favoráveis para a melhoria da durabilidade do concreto. O ensaio de absorção de água por imersão evidenciou um aumento na absorção de água com o aumento do teor de EGAF, porém todas as amostras mantiveram-se abaixo de 10% de absorção, sugerindo resultados promissores para a durabilidade do concreto.

O ensaio de ataque por ácido sulfúrico demonstrou que a presença significativa de EGAF retardou o desgaste superficial das amostras. Em relação ao comportamento mecânico, as amostras com 70% e 80% de substituição apresentaram resistências à compressão superiores a 32 MPa, permitindo sua aplicação em concretos estruturais. A amostra com 90% de substituição pode ser adequada para aplicações não estruturais, como argamassas ou acabamentos.

Além dos benefícios para as propriedades do concreto, a substituição do Cimento Portland por EGAF traz vantagens ambientais significativas. A EGAF é um subproduto da indústria siderúrgica, reduzindo o impacto ambiental associado à produção de cimento Portland. Portanto, as análises sugerem a EGAF como um substituto viável do Cimento Portland em grandes proporções. As amostras demonstraram-se promissoras para diversas aplicações, destacando-se sua durabilidade e reatividade.

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] I. De, S. Morais, V. Mineração, L. Magalhaes, E. Carballo, S. Corrêa, R.M. Rocha, O. Menezes, Sericitic Phyllite as Addition in Portland Cement Reuse of construction waste civil and mining View project Niobium additions in cast iron View project, Trans Tech Publ (2018). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.930.131.

[2] P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, Fourth Edition, 4th ed., McGraw-Hill Education, New York, 2014.

[3] ABNT, NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos, Assoc. Bras. NORMAS TÉCNICAS (2018).

[4] B. Lothenbach, K. Scrivener, R.D. Hooton, Supplementary cementitious materials, Cem. Concr. Res. 41 (2011) 1244–1256. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001.

[5] Supriya, R. Chaudhury, U. Sharma, P.C. Thapliyal, L.P. Singh, Low-CO2 emission strategies to achieve net zero target in cement sector, J. Clean. Prod. 417 (2023) 137466. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.137466.

[6] ABNT, NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão, Assoc. Bras. NORMAS TÉCNICAS (2019).

[7] ABNT, NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Assoc. Bras. NORMAS TÉCNICAS (2005).

[8] P.C.R.A. Abrão, F.A. Cardoso, V.M. John, Efficiency of Portland-pozzolana cements: Water demand, chemical reactivity and environmental impact, Constr. Build. Mater. 247 (2020) 118546. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118546.

[9] B. Walkley, R. San Nicolas, M.A. Sani, S.A. Bernal, J.S.J. van Deventer, J.L. Provis, Structural evolution of synthetic alkali-activated CaO-MgO-Na2O-Al2O3-SiO2 materials is influenced by Mg content, Cem. Concr. Res. 99 (2017) 155–171. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.006.

[10] S. Luo, M. Liu, L. Yang, J. Chang, W. Yang, X. Yan, H. Yu, Y. Shen, Utilization of waste from alumina industry to produce sustainable cement-based materials, Constr. Build. Mater. 229 (2019) 116795. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116795.

[11] A.M.T. Simonsen, S. Solismaa, H.K. Hansen, P.E. Jensen, Evaluation of mine tailings' potential as supplementary cementitious materials based on chemical, mineralogical and physical characteristics, Waste Manag. 102 (2020) 710–721. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.037.

[12] D. Li, R. Sun, D. Wang, C. Ren, K. Fang, Study on the pozzolanic activity of ultrafine circulating fluidized-bed fly ash prepared by jet mill, Fuel 291 (2021) 120220. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120220.

[13] M. Keppert, E. Vejmelková, P. Bezdička, M. Doleželová, M. Čáchová, L. Scheinherrová, J. Pokorný, M. Vyšvařil, P. Rovnaníková, R. Černý, Red-clay ceramic powders as geopolymer precursors: Consideration of amorphous portion and CaO content, Appl. Clay Sci. 161 (2018) 82–89. https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2018.04.019.

[14] T. Gonçalves, R. V. Silva, J. de Brito, J.M. Fernández, A.R. Esquinas, Mechanical and durability performance of mortars with fine recycled concrete aggregates and reactive magnesium oxide as partial cement replacement, Cem. Concr. Compos. 105 (2020) 103420. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103420.

[15] N.J. John, I. Khan, A. Patel, Evaluation of the crushing characteristics of industrial waste aggregates as construction materials, Constr. Build. Mater. 403 (2023) 133111. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.133111.

[16] P.C. Aïtcin, Supplementary cementitious materials and blended cements, Sci. Technol. Concr. Admixtures (2016) 53–73. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00004-7.

[17] J. Halbiniak, J. Katzer, M. Major, I. Major, A proposition of an in situ production of a blended cement, Materials (Basel). 13 (2020). https://doi.org/10.3390/ma13102289.

[18] L.W.O. Soares, R.M. Braga, J.C.O. Freitas, R.A. Ventura, D.S.S. Pereira, D.M.A. Melo, The effect of rice husk ash as pozzolan in addition to cement Portland class G for oil well cementing, J. Pet. Sci. Eng. 131 (2015) 80–85. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.04.009.

[19] A. de Magalhães, Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno, (2007). https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/PASA-7LDGM4 (accessed May 26, 2024).

[20] A.M. Neville, Properties of concrete, Pearson, 2011.