USO DE ADITIVOS PLASTIFICANTES EM PASTAS ÁLCALI-ATIVADAS: ESTUDO NA MISTURA BINÁRIA DE RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA E ESCÓRIA DE ALTO FORNO

USE OF PLASTIFYING ADDITIVES IN ALKALI-ACTIVATED CONCRETE: STUDY ON THE BINARY MIXTURE OF RED CERAMIC WASTE AND BLAST FURNACE SLAG

Iuri Veríssimo Mendonça
UFC | Fortaleza, Ceará | iurivm13@gmail.com

Marcella Maria Gomes Damasceno
UFC | Fortaleza, Ceará | marcelladamasceno@alu.ufc.br

Eduarda Prudente de Almeida de Paula Barros
UFC | Fortaleza, Ceará | dudaprudentebarros@gmail.com

Heloina Nogueira da Costa
UFC | Fortaleza, Ceará | heloina@ufc.br

Antônio Eduardo Bezerra Cabral
UFC | Fortaleza, Ceará | eduardo.cabral@ufc.br

Resumo

O cimento Portland é um dos principais materiais da construção civil, contudo, durante a sua produção é emitido uma quantidade significativa de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera. Diante disso pesquisadores têm buscado alternativas sustentáveis para reduzir o consumo de cimento, com destaque para os materiais álcali-ativados (MAA), compostos por resíduos reciclados e ativadores químicos. No entanto, a trabalhabilidade dos MAAs é um dos fatores limitantes da sua aplicação em larga escala. Portanto, esse trabalho tem como objetivo avaliar o efeito de diferentes tipos de aditivos superplastificantes em pastas álcali-ativadas compostas por resíduo cerâmico (RC) e escória de alto forno (EAF) como precursores e hidróxido de sódio (NAOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3) como ativadores. Foram realizados o teste de varredura de fluxo e mini-slump no estado fresco e resistência à compressão no estado endurecido. Os resultados indicam que à adição de ambos os aditivos melhoram os parâmetros reológicos e a trabalhabilidade da pasta em até 23,68%, porém reduz a resistência à compressão em até 70% para 2,0% de aditivo.

Palavras-chave: Pastas álcali-ativadas; Resíduo Cerâmico; Escória de Alto Forno; Aditivos Superplastificantes.

ABSTRACT

Portland cement is one of the main materials used in civil construction; however, during its production, a significant amount of carbon dioxide (CO2) is emitted into the atmosphere. Therefore, researchers have sought sustainable alternatives to reduce cement consumption, with emphasis on alkali-activated materials (AAM), composed of recycled waste and chemical activators. However, the workability of AAM is one of the limiting factors for their large-scale application. Therefore, this work aims to evaluate the effect of different types of superplasticizing additives in alkali-activated pastes composed of ceramic elimination (RC) and blast furnace slag (BFS) as precursors and sodium hydroxide (NAOH) and sodium silicate (Na2SiO3) as activators. Flow sweep and mini-slump tests were performed in the fresh state and compressive strength in the hardened state. The results indicate that the addition of both additives improves the rheological parameters and workability of the paste by up to 23.68%, but reduces the specification strength by up to 70% for 2.0% of aditive

Keywords: Alkali-activated concretes; Ceramic Waste; Blast Furnace Slag; Super plasticizing Additives.

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um dos materiais mais importantes da construção civil, no entanto, apresenta um impacto ambiental considerável devido ao dióxido de carbono (CO_2) emitido durante a sua produção. Buscar alternativas sustentáveis para a sua substituição, como os materiais álcali-ativados (MAA), torna-se de extrema importância. Em 2022, a produção de cimento ultrapassou 4 bilhões de toneladas, sendo responsável por 5% a 8% das emissões globais de CO_2 (Araos; Aponte; Barra, 2024). Projeções indicam que a produção de cimento continuará a aumentar, elevando as emissões de CO_2 entre 12% e 23% até 2050 (Li *et al*., 2024), o que reforça a necessidade de alternativas sustentáveis (Hamdan *et al*., 2023). Nesse contexto, os materiais álcali-ativados, com menor pegada de carbono que o cimento Portland (Singh *et al*., 2015), desponta como uma solução promissora.

Os materiais álcali-ativados (MAA) são aglutinantes não hidráulicos que, em comparação aos ligantes convencionais, apresentam potencial para reduzir as emissões de CO_2 em até 80% (Fernando *et al*., 2023). Compostos basicamente por alumina (Al_2O_3), sílica (SiO_2) e óxido de cálcio (CaO), os MAA são ativados por soluções alcalinas, como silicato e hidróxido de sódio, formando géis C-A-S-H (aluminossilicato de cálcio hidratado) e N-A-S-H (aluminossilicato de sódio hidratado) como principal produto (Juenger, Winnefeld, *et al*., 2011). A crescente utilização de resíduos na produção de materiais cimentícios álcali-ativados demonstra o potencial dessa tecnologia para a reutilização e reciclagem de resíduos minerais e industriais. Estudos indicam que os MAAs apresentam propriedades mecânicas e de durabilidade comparáveis ao concreto convencional, além de desempenho superior em relação à resistência ao fogo e a altas temperaturas (Tayer *et al*., 2021).

Apesar das vantagens, os MAAs ainda enfrentam desafios relacionados à baixa trabalhabilidade (Verma *et al*., 2021). Desse modo, esse trabalho tem como objetivo avaliar pastas álcali-ativadas compostas por resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e escória de alto forno (EAF) como precursores, silicato de sódio (Na_2SiO_3) e hidróxido de sódio (NaOH) como ativadores e aditivos plastificantes, através da análise de parâmetros reológicos e resistência à compressão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados foram o resíduo de blocos de cerâmica vermelha (RCV) e a escória de alto forno (EAF) como precursores, silicato de sódio (Na_2SiO_3) e hidróxido de sódio (NaOH) como ativadores, e os aditivos Powerflow 4105 e Powerflow 4010, ambos da marca Mc Bauchemie. Os precursores foram britados, moídos e peneirados em malha de 75 µm. Através do ensaio de granulometria à laser, foi obtido um tamanho médio de partículas de 36,19 µm para a EAF e 34,62 µm para o RCV. E a composição química, determinada por Fluorescência de Raio X (FRX), apresentaram teores de 33,83% de SiO_2, 14,1% de Al_2O_3 e 41,41% de CaO para a EAF e 58,85% de SiO_2, 17,82% de Al_2O_3 e 2,03% de CaO para o RC.

2.2 MÉTODOS

As pastas foram preparadas em uma argamassadeira eletromecânica por cisalhamento a 285 rpm durante 4 minutos para o mini-slump e misturadas manualmente durante 5 minutos para a reologia de fluxo, e os ensaios foram realizados logo após a produção. Para o ensaio de resistência à compressão as misturas foram moldadas em cubos de 40 x 40 x 40 mm, desmoldadas após 24 horas de cura em estufa a 60 ºC e, em seguida, armazenadas em temperatura ambiente até a idade de análise. Foram feitas sete misturas: uma pasta de referência sem a adição de aditivo plastificante (TREF), três pastas com a adição do Powerflow 4105 (T1,0A; T1,5A; T2,0A) e três pastas com o aditivo Powerflow 4010 (T1,0B; T1,5B; T2,0B), com 1,0%, 1,5% e 2,0% de adição respectivamente, com a seguinte proporção em kg/m³: 766,92 : 766,82 : 75,99 : 325,36 : 444,02 (RCV : EAF : NAOH : Na_2SiO_3 : Água).

A caracterização no estado fresco foi realizada utilizando o ensaio de mini-slump. O diâmetro de espalhamento das pastas foi determinado com base na média de três medições distintas, conforme descrito por Kantro (1980).

O teste de resistência à compressão foi realizado após 24 horas, 7 dias e 28 dias, conforme a NBR 16738 (ABNT, 2019). O ensaio foi executado com uma velocidade de aplicação de carga de (2400 ± 200) N/s, utilizando a Máquina Universal de Ensaios, modelo DL 30000, da marca EMIC, com capacidade de 300 kN. Foram utilizados três CPs para obter a resistência média à compressão de cada amostra.

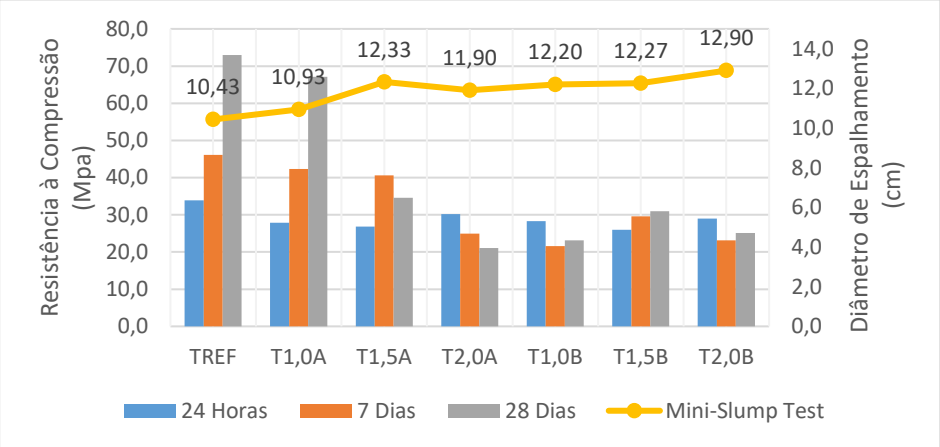
O comportamento reológico das pastas TREF, T1,5A e T1,5B foram examinados através de um teste de varredura de fluxo, realizado a 25 °C utilizando um reômetro AR2000 da TA Instruments. A configuração utilizada foi a de placa-placa com 40 mm de diâmetro e um intervalo de 1 mm.

3 RESULTADOS

3.1 TRABALHABILIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A trabalhabilidade das amostras teve um aumento com a adição de ambos os aditivos plastificantes.

Gráfico 3.1.1: Resultados do mini-slump das pastas e resistência à compressão



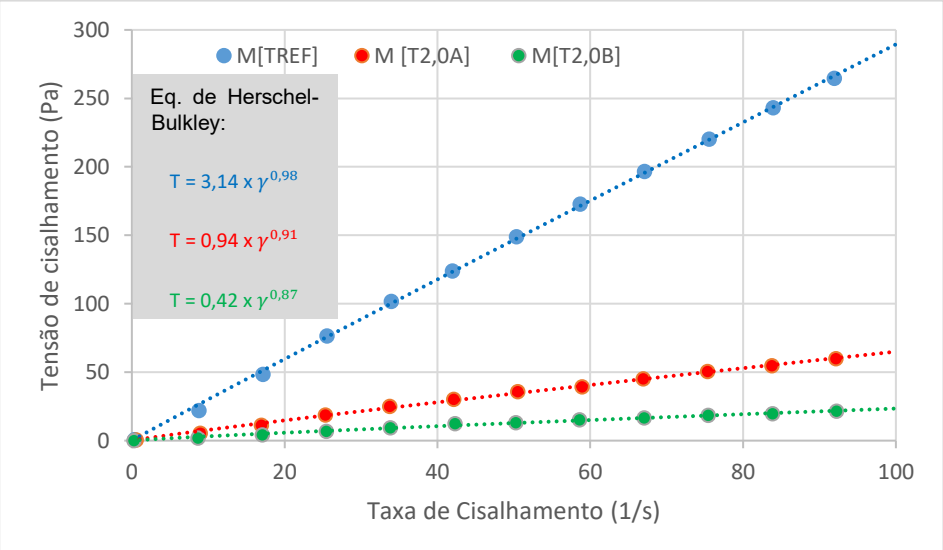
Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que o traço de referência (TREF) atingiu a resistência esperada superior a 30 MPa, logo após 24 horas (33,90 MPa), o que não ocorreu para as amostras com adição de aditivo superplastificante. Aos 7 dias, apenas as amostras com adição do aditivo A (Powerflow 4105), T1,0A e T1,5A, ultrapassaram 30 MPa. Os resultados foram semelhantes ao estudado por Sathonsaowaphak et. al (2009), que na sua pasta álcali-ativada composta por cinzas residuais de linhito e superplastificante à base de naftalina aumentaram a trabalhabilidade e diminuíram a resistência.

3.2 REOLOGIA

O teste de varredura de fluxo gerou curvas de tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento para as pastas produzidas.

Gráfico 3.2.1: Curva de fluxo das pastas ativadas por álcalis ajustadas com o modelo de Herschel-Bulkey



Fonte: Elaborado pelo autor

O parâmetro de viscosidade, medido pela curva de ajuste HB, indica uma diminuição da viscosidade com a adição dos aditivos. No estudo de Carvalho et al. (2024), a viscosidade da pasta álcali-ativada com os mesmos precursores foi reduzida devido à elevada porcentagem de RCV na composição, associada à menor taxa de dissolução na mistura. De forma semelhante, um estudo mais recente realizado por Fan et al. (2025) avaliou a viscosidade plástica de geopolímeros sustentáveis baseados em metacaulim com a incorporação de resíduos de vidro de garrafas long neck. Os resultados indicaram que a resistência ao fluxo diminuiu com o aumento do conteúdo de resíduos no sistema, o que está alinhado com a redução da viscosidade observada no estudo de Carvalho et al. (2024). Além disso, o estudo destacou que a substituição parcial do metacaulim por resíduos de vidro resultou em uma menor resistência ao fluxo, mas manteve a ocorrência de geopolimerização, mesmo com resíduos de vidro.

4 CONCLUSÕES

A adição de aditivos plastificantes nas pastas Álcali-Ativadas tem uma influência considerável na trabalhabilidade e resistência à compressão. Ambos os aditivos plastificantes (Powerflow 4105 e Powerflow 4010) melhoraram a trabalhabilidade da pasta, com registro de aumento de 23,68% para a amostra T2,0B em relação a pasta de referência. Porém, os aditivos reduziram a resistência à compressão, exceto a amostra T1,0A, que atingiu uma resistência de 67,16 MPa aos 28 dias. O ensaio de reologia confirmou a trabalhabilidade obtida no ensaio de mini-slump. Apesar da baixa resistência em relação ao traço de referência, as pastas ainda podem ser indicadas para execução de blocos de vedação, piso grama, cogobós e artefatos, pois possuem resistência adequada e boa trabalhabilidade para preencher as fôrmas.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Projeto CNPq n° 409236/2022-5 (Melhoramento e valorização de produtos cerâmicos do APL Cerâmica Vermelha do Baixo Jaguaribe/CE) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

HAMDAN, A.; SONG, H.; YAO, Z.; ALNAHHAL, M. F.; KIM, T.; HAJIMOHAMMADI, A. Modifications to reaction mechanisms, phase assemblages and mechanical properties of alkali-activated slags induced by gypsum addition. **Cement and Concrete Research**, v. 174, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107311.

TAYEH, B. A.; ZEYAD, A. M.; AGWA, I. S.; AMIN, M. Effect of elevated temperatures on mechanical properties of lightweight geopolymer concrete. Case Studies in Construction Materials, v. 15, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00673.

SINGH, B.; ISHWARYA, G.; GUPTA, M.; BHATTACHARYYA, S. K. Concreto geopolímero: uma revisão de alguns desenvolvimentos recentes. Construction and Building Materials, v. 85, p. 78-90, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036.

CARVALHO, I.; CABRAL, C. A.; KAIRCHHEIM, E.; OLIVEIRA, G. P.; COSTA, H. N. Utilization of red ceramic waste in the production of binary eco-friendly alkali-activated binder: Fresh and hardened state investigation. Case Studies in Construction Materials, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03681.

LI, H.; LIU, F.; PAN, Z.; LI, H.; WU, Z.; LI, L.; XIONG, Z. Use of supplementary cementitious materials in seawater–sea sand concrete: State-of-the-art review. Construction and Building Materials, v. 425, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136009.

JUENGER, M. C. G.; WINNEFELD, F.; PROVIS, J. L.; IDEKER, J. H. Advances in Alternative Cementitious Binders. Cement and Concrete Research, v. 41, p. 1232-1243, 2011. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012.

SATHONSAOWAPHAK, A.; CHINDAPRASIRT, P.; PIMRAKSA, K. Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. Journal of Hazardous Materials, v. 168, n. 1, p. 44-50, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.120.

FERNANDO, S.; GUNASEKARA, C.; LAW, D. W.; NASVI, M. C. M.; SETUNGE, S.; DISSANAYAKE, R. Avaliação de longo prazo propriedades de durabilidade da mistura de cinza volante e cinza de casca de arroz concreto ativado por álcali. Construction and Building Materials, v. 369, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130449.

VERMA, R.; KUMAR, P.; SINGH, S. Reaction mechanisms of alkali-activated materials. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 14, n. 3, p. 123-135, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/S1983-419520210003000.

FAN, Z.; KONG, L.; LU, J.; WANG, X. Plastic viscosity, microstructural, and mechanical characteristics of sustainable geopolymers based on metakaolin with the incorporation of long-neck bottles waste glass. Materials and Structures, v. 56, artigo 29, 2025. DOI: https://doi.org/10.1617/s11527-023-02120-0.