XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.9025

Aditivos plastificantes em concreto álcali-ativado com resíduo cerâmico e escória

Plasticizing additives in alkali-activated concrete with ceramic waste and slag

Iuri Veríssimo Mendonça
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza | Brasil | iurivm13@alu.ufc.br
João Victor Teles Tavares
Universidade Federal do Ceará| Fortaleza | Brasil | joaovictor.engcivil@alu.ufc.br
Heloína Nogueira da Costa
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza | Brasil | heloina@ufc.br
Antônio Eduardo Bezerra Cabral
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza | Brasil | Eduardo.cabral@ufc.br

Resumo

Ligantes álcali-ativados reduzem a pegada de carbono, mas sua compatibilidade com aditivos comerciais permanece limitada. Este estudo avaliou superplastificantes à base de policarboxilato (PCE) em concretos álcali-ativados (CAA) produzidos com escória de alto-forno e cerâmica vermelha. Dois PCEs líquidos indicados para matrizes com cimento Portland foram testados: Aditivo A e B, com densidades de 1,10 g/cm³ e 1,03 g/cm³, respectivamente. O programa experimental incluiu a avaliação da reologia, slump-test e flow test no estado fresco, bem como resistência à compressão e módulo de elasticidade no estado endurecido. A adição de 1,5% aumentou a trabalhabilidade em mais de 18%, mas reduziu a resistência à compressão aos 28 dias em ~35% e o módulo de elasticidade em ~48%, e, de forma complementar, as análises de TG e FTIR indicaram menor formação de géis C-A-S-H e N-A-S-H. O desempenho dos PCEs em CAAs difere significativamente dos sistemas Portland, reforçando a necessidade de desenvolvimento de aditivos plastificantes específicos para matrizes álcali-ativadas.

Palavras-chave: Concreto álcali-ativado. Aditivos superplastificantes. Resíduo de cerâmica vermelha. Escória de Alto-forno.

Abstract

Alkali-activated binders reduce the carbon footprint, but their compatibility with commercial additives remains limited. This study evaluated polycarboxylate-based superplasticizers (PCE) in alkali-activated concrete (AAC) produced with blast furnace slag and red ceramic. Two liquid PCEs suitable for Portland cement matrices were tested: Additives A and B, with densities of 1.10 g/cm³ and 1.03 g/cm³, respectively. The experimental program included the evaluation of rheology, slump test, and flow test in the fresh state, as well as compressive strength and modulus of elasticity in the hardened state. The addition of 1.5% increased workability by more than 18%, but reduced the 28-day compressive strength by ~35% and the modulus of elasticity by ~48%; additionally, TG and FTIR analyses indicated reduced formation of C-A-S-H and N-A-S-H gels. The performance of PCEs in AAS differs significantly from that in Portland cement systems, reinforcing the need to develop specific plasticizing additives for alkali-activated matrices.

Keywords: Alkali-activated concrete. Superplasticizing additive. Red ceramic waste. Blast furnace slag.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.9025

INTRODUÇÃO

A utilização de ligantes álcali-ativados na produção de concreto é atrativa por aproveitar resíduos industriais, como os da siderurgia e da cerâmica vermelha, e por apresentar uma menor pegada de carbono [1], quando comparada ao concreto produzido com cimento Portland, visto que a produção do cimento representa entre 5% e 8% das emissões globais de CO_2 [2].

As soluções ativadoras alcalinas frequentemente produzem misturas com alta viscosidade e fluidez limitada em comparação com misturas de concreto feitas com cimento Portland [3], o que restringe a facilidade de moldagem, bombeamento e acabamento em ambientes de construção reais.

Além disso, variabilidade do projeto de mistura e da química dos precursores dificulta a obtenção de propriedades consistentes no concreto fresco e endurecido em processos convencionais de produção, o que limita as aplicações generalizadas dos materiais álcali-ativados, mas abre possibilidades para o desenvolvimento de materiais que melhorem seu desempenho [4].

Nesse contexto, a aplicação de aditivos químicos para melhorar a trabalhabilidade de concretos álcali-ativados ainda representa um desafio, visto que os aditivos convencionais foram desenvolvidos para atuar sobre os aluminatos do clínquer [5], que são praticamente inexistentes em matrizes álcali-ativadas. Normalmente, os ligantes álcali-ativados requerem a inclusão de superplastificantes com dispersantes copolímeros para melhorar sua trabalhabilidade e características de fluxo, devido às soluções alcalinas viscosas utilizadas para facilitar a reação [6].

Além disso, o desempenho de dispersantes comerciais em concretos álcali-ativados (CAA) pode diferir significativamente de seu comportamento em misturas de PC, principalmente devido às diferentes químicas aquosas e de estado sólido dos dois sistemas. Por exemplo, os ativadores de CAA criam ambientes de pH mais elevado e condições eletrolíticas distintas [7], enquanto o tipo de precursor utilizado pode alterar características de superfície, como carga superficial, conteúdo iônico e morfologia. Como resultado, as interações entre superplastificantes e CAA são complexas, exigindo uma compreensão mais profunda da química subjacente para otimizar o desempenho [4].

Desse modo, este estudo tem como objetivo avaliar a influência de superplastificantes à base de policarboxilato (PCE) indicados para uso em matrizes de cimento Portland na trabalhabilidade e no desempenho mecânico de concretos álcali-ativados (CAA) produzidos a partir de resíduos de cerâmica vermelha (RCV) e escória de alto-forno (EAF).

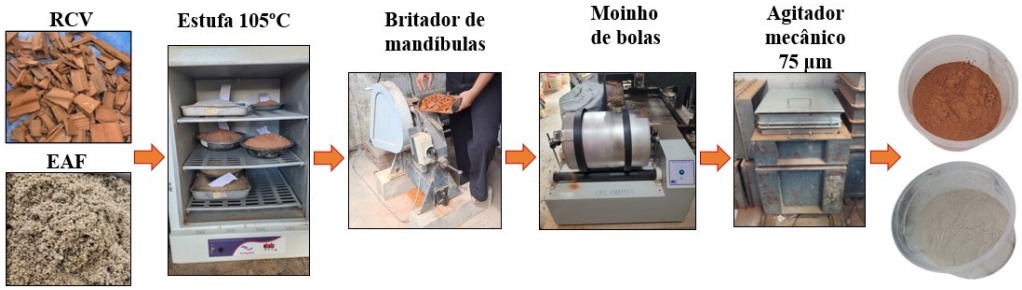
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.9025

MATERIAIS E MÉTODOS

LIGANTES

Os precursores utilizados foram resíduos de cerâmica vermelha (RCV), provenientes de uma fábrica de cerâmica no Vale do Jaguaribe (APL), e escória de alto-forno (EAF), fornecida pela ArcelorMittal no Complexo Industrial e Portuário de Pecém (CIPP). Ambos os materiais foram secos em estufa a 100 °C por 24 horas. Em seguida, o RCV foi triturado e, posteriormente, tanto o RCV quanto a EAF foram moídos e peneirados para reter apenas partículas menores que 75 µm, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Processamento dos precursores



Fonte: Autor.

A composição química dos materiais (Tabela 1) foi determinada por fluorescência de raios X (FRX). De acordo com a norma ABNT NBR 16605:2017, o RCV apresentou uma massa específica de 2,65 g/cm³, enquanto o EAF registrou 2,93 g/cm³. A distribuição granulométrica foi determinada por granulometria a laser. Os precursores apresentaram diâmetro médio de partículas (DMC) de 34,62 µm para o RCV e 36,19 µm para a EAF.

Tabela 1: Composição química dos materiais

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SO_3	Outros
RCV	53,31	19,79	11,83	10,10	-	0,88	-	4,09
EAF	30,53	9,76	0,74	54,17	3,07	0,38	1,10	0,25

RCV: Resíduo de cerâmica vermelha; EAF: Escória de alto-forno.

Fonte: Autor.

Foram utilizados dois PCEs líquidos: (i) um formulado para concreto de alto desempenho, com densidade de 1,10 kg/L (Aditivo A); e (ii) outro com um perfil mais amplo, com densidade de 1,03 g/cm³ (Aditivo B).

Os ativadores alcalinos utilizados foram uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), preparada a partir de escamas com 98,5% de pureza e densidade de 2,130 g/cm³, e uma solução comercial de silicato de sódio (Na_2SiO_3), com densidade de 1,583 g/cm³, composta por 33% de SiO_2, 15% de Na_2O e 53% de H_2O.

Utilizou-se areia natural como agregado miúdo e pedra britada nas granulometrias de 12,5 mm e 19,0 mm como agregado graúdo. A areia apresentou massa específica de 2,65 g/cm³, absorção de água de 0,13% (ABNT NBR 16916:2021) e massa unitária de 1,471 g/cm³ (ABNT NBR 16972:2021). A distribuição granulométrica, resultou em diâmetro máximo característico (DMC) de 4,75 mm e módulo de finura (MF) de 2,44 (NM 248:2003).

A brita G12,5 apresentou DMC de 12,5 mm, MF de 5,81, massa específica de 2,63 g/cm³, absorção de água de 0,81% (ABNT NBR 16917:2021) e massa unitária de 1,473 g/cm³ (ABNT NBR 16972:2021). A brita G19,0 apresentou DMC de 19,0 mm, MF de 6,94, massa específica de 2,68 g/cm³, absorção de água de 0,74% (ABNT NBR 16917:2021) e massa unitária de 1,462 g/cm³ (ABNT NBR 16972:2021).

Os agregados graúdos (G12,5 e G19,0) foram lavados e, em seguida, submetidos à secagem em estufa a 105 ºC ± 5 ºC por 24 h. O agregado miúdo, por sua vez, foi apenas submetido à secagem em estufa nas mesmas condições.

MÉTODOS

As pastas álcali-ativadas utilizadas neste estudo foram previamente desenvolvidas e caracterizadas por [8], onde se encontram descritos em detalhe a metodologia de preparação, os ensaios reológicos e os resultados de resistência à compressão. A partir desse estudo, foram selecionadas as pastas TREF, T1,5A e T1,5B para a execução dos concretos (Table 2), devido ao desempenho observado em termos de trabalhabilidade e resistência mecânica.

Tabela 2: Proporções de mistura do concreto

Mistura	RCV (Kg/m³)	EAF (Kg/m³)	NaOH (Kg/m³)	Na_2SiO_3 (Kg/m³)	Brita (Kg/m³)	Areia (Kg/m³)	Água (Kg/m³)	Aditivo (%/type)
TREF	239,82	239,82	23,76	101,74	528,30	353,04	138,85	-
T1,5A	239,82	239,82	23,76	101,74	528,30	353,04	138,85	1,5/A
T1,5B	239,82	239,82	23,76	101,74	528,30	353,04	138,85	1,5/B

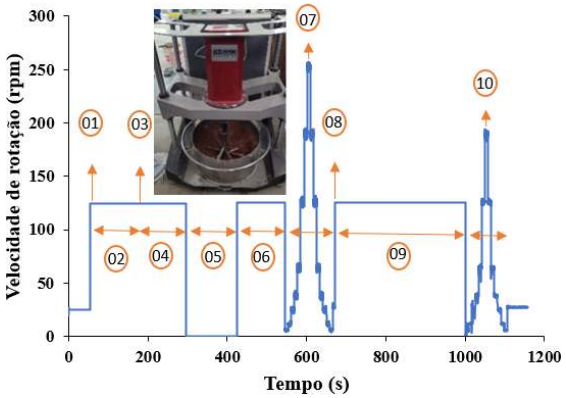
Fonte: Autor.

As misturas foram compostas por 40% de pasta e 60% de agregados, sendo estes constituídos por 60% de agregado graúdo e 40% de agregado miúdo. Dos agregados graúdos, 40% corresponderam à brita G12,5 e 60% à brita G19,0, conforme as indicações de [9].

No estado fresco, a reologia foi realizada em reômetro planetário Pheso, com a geometria tipo atrito de seis aletas helicoidais duplas, de 16 mm de diâmetro e 130 mm de comprimento, O material foi submetido a ciclos controlados de mistura e cisalhamento, conforme etapas da Fig. 2.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.9025

Figura 2: Representação do modelo reológico



01 – Adição do material em pó e agregados finos
02 – Mistura de pó e agregados finos a 125 RPM
03 – Adição de 90% de líquido
04 – Ciclo de mistura a 125 RPM
05 – Pausa para raspar as paredes do reômetro
06 – Ciclo de mistura a 125 RPM
07 – Ciclo de cisalhamento com aceleração e desaceleração graduais entre 6 RPM e 250 RPM
08 – Adição de agregados graúdos e 10% de líquido
09 – Ciclo de mistura a 125 RPM
10 – Ciclo de cisalhamento com aceleração e desaceleração graduais entre 6 RPM e 190 RPM

Fonte: Autor.

A interpretação do comportamento de fluxo foi realizada com base nos modelos de Herschel–Bulkley e Bingham. Como a geometria do reômetro utilizada gera distribuições não uniformes de tensão e taxa de cisalhamento, os parâmetros reológicos foram obtidos a partir das relações entre torque e velocidade de rotação, utilizando versões adaptadas dos modelos clássicos, conforme [10].

Após a etapa de mistura, realizou-se o ensaio de abatimento do tronco de cone (ABNT NBR 16889:2020) para a amostra TREF e o ensaio de espalhamento (flow test), conforme ABNT NBR 15823, para as amostras T1,5A e T1,5B. Em seguida, os corpos de prova foram moldados em moldes cilíndricos de 10 × 20 cm, de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 5738:2015.

Foram moldados nove corpos de prova (CP) de cada mistura para execução dos ensaios no estado endurecido, sendo seis CPs destinados ao ensaio de resistência à compressão, sendo três testados aos 7 dias e três aos 28 dias, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 5738:2015, e três CPs para determinação do módulo de elasticidade (ABNT NBR 8802:2019) aos 28 dias.

Após o rompimento dos corpos de prova aos 28 dias, fragmentos foram coletados do seu interior, triturados até passagem total na peneira de 63 µm e secos em estufa a 40 °C por 24 h, para posterior caracterização microestrutural por Termogravimetria (DTG) e Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).

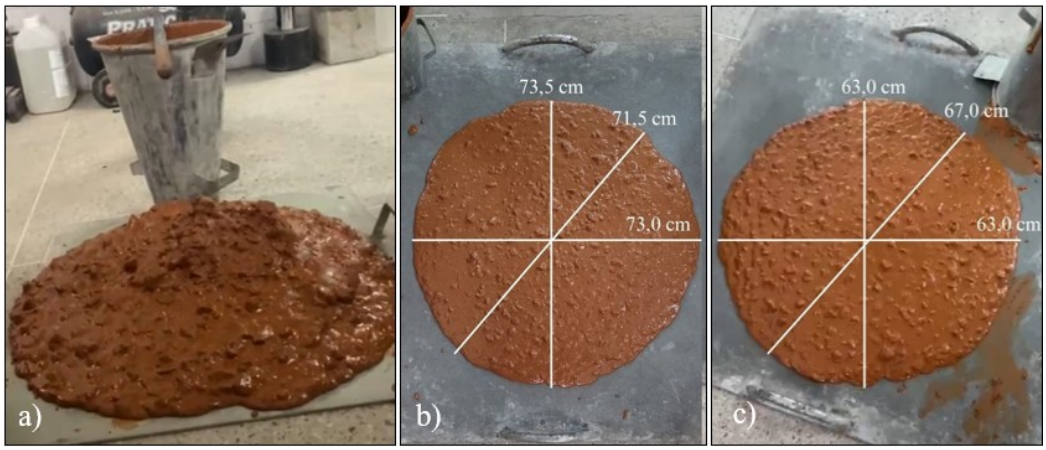
RESULTADOS E DISCUSSÃO

SLUMP TEST, FLOW TEST E REOLOGIA

A mistura de referência (TREF) apresentou um abatimento de 240 mm, valor que excede o limite máximo estabelecido pela ABNT NBR 8953, cuja faixa superior de consistência é a classe S220 (220 ± 10 mm). Esse resultado indica que o concreto álcali-ativado desenvolvido possui uma consistência extremamente fluida, situando-se além das classificações convencionais para concretos estruturais tradicionais.

Embora o TREF já apresente boa trabalhabilidade, ainda há razões para avaliar o uso de superplastificantes, seja pelo controle da reologia, uma vez que a fluidez natural pode ser elevada, mas nem sempre estável, exigindo modulação da viscosidade para evitar segregação ou exsudação, pela comparação com sistemas Portland, já que os PCEs foram originalmente desenvolvidos para esse tipo de cimento e sua aplicação em CAAs permite identificar diferenças de desempenho e limitações de compatibilidade, ou ainda pela aplicabilidade prática, pois em condições reais de obra pode ser necessário ajustar a trabalhabilidade para atender às demandas de transporte, bombeamento e lançamento.

Figura 3: a) Slump test da amostra TREF; b) c) Flow test das amostras T1,5A e T1,5B, respectivamente



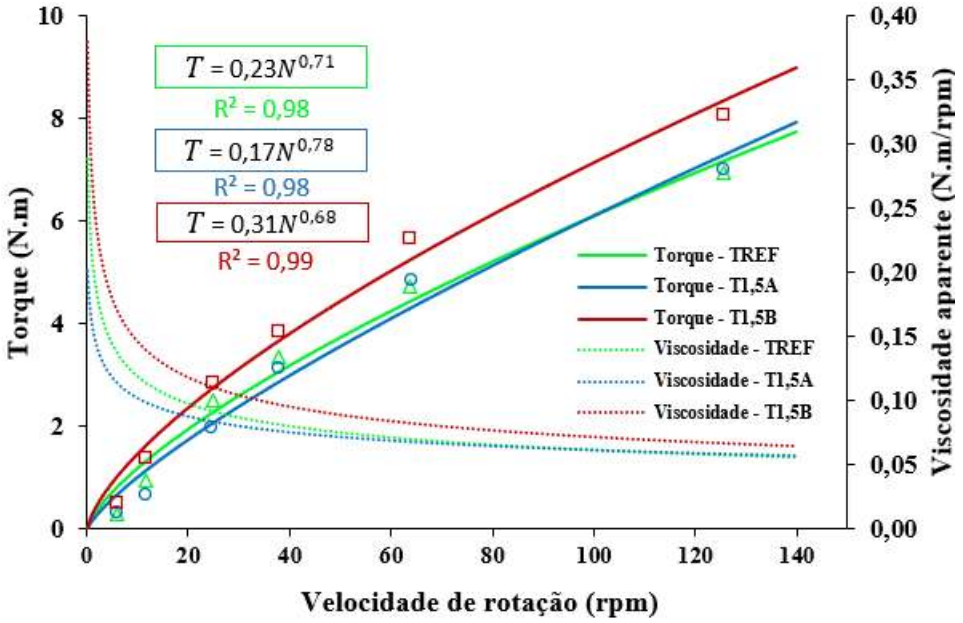
Fonte: Autor.

Para a amostra T1,5A, foram obtidos diâmetros de espalhamento de 73,5 cm, 71,5 cm e 73,0 cm, indicando uma elevada capacidade de escoamento e comportamento típico de concretos autoadensáveis. Já a amostra T1,5B apresentou valores de 63,0 cm, 63,0 cm e 67,0 cm, revelando uma fluidez inferior em comparação à T1,5A, embora ainda dentro dos limites aceitáveis para concretos com boa trabalhabilidade. Pileggi [9] destaca que valores superiores a 70 cm são compatíveis com concretos autoadensáveis, desde que haja coesão adequada para evitar segregação.

A diferença observada entre os resultados evidencia o impacto direto da natureza do aditivo utilizado na reologia da mistura, sendo o aditivo A mais eficaz na promoção da dispersão das partículas e na redução da viscosidade aparente do sistema.

Para a composição do modelo reológico equivalente, foram utilizados apenas os pontos referentes à etapa de descarregamento de cada mistura, conforme metodologia adotada por [11]. A Fig. 3 demonstra que todos os concretos apresentaram comportamento compatível com o modelo pseudoplástico, evidenciado pela redução da viscosidade aparente com o aumento da velocidade de rotação, característica típica de materiais com comportamento shear-thinning [12].

Figura 4: Curva de fluidez do concreto álcali-ativado ajustada ao modelo de Herschel-Bulkley



Fonte: Autor.

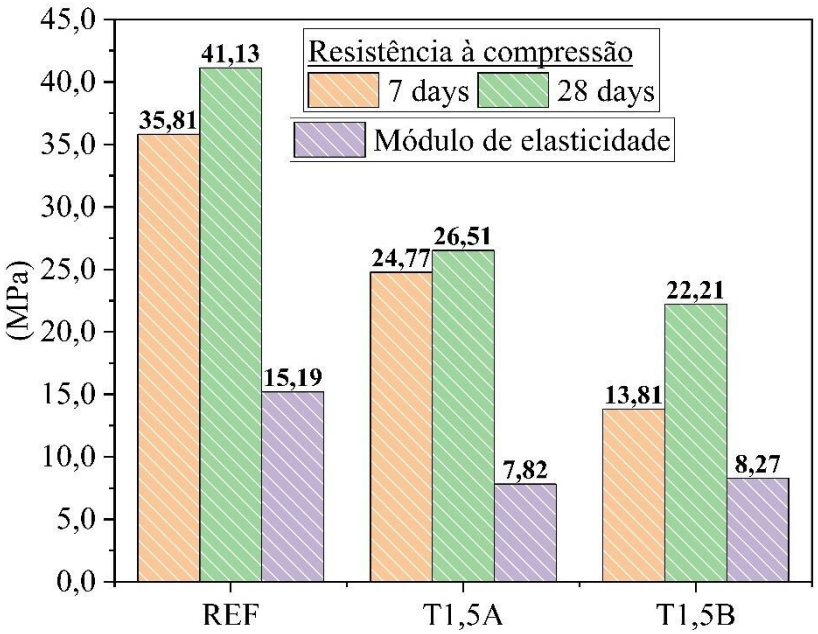
A mistura T1,5B apresentou os maiores valores de torque ao longo das rotações analisadas, indicando maior resistência ao escoamento e maior viscosidade aparente. Em contrapartida, as misturas TREF e T1,5A apresentaram menores valores de torque, evidenciando maior facilidade de fluxo. Esses resultados corroboram os ensaios de trabalhabilidade, nos quais a T1,5A apresentou maior espalhamento médio (≈72,7 cm) em comparação à T1,5B (≈64,3 cm), confirmando que misturas com menor resistência reológica tendem a apresentar maior fluidez no estado fresco [13].

RESISTÊNCIA MECÂNICA E MÓDULO DE ELASTICIDADE

A Figura 4 apresenta os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Aos 28 dias, as amostras T1,5A e T1,5B registraram perdas de resistência de 35,54% e 46,00%, respectivamente, em comparação à amostra de referência sem aditivo superplastificante (TREF). Além disso, observaram-se reduções no módulo de elasticidade de 48,52% e 45,55%, respectivamente.

Essa redução pode ser atribuída à alta alcalinidade dos CAAs, que podem degradar ou hidrolisar os superplastificantes, comprometendo sua capacidade de dispersão [14]. Além disso, os aditivos podem interferir na cinética da ativação alcalina, alterando a formação dos principais produtos da reação [15] e, em excesso, causar segregação ou reduzir a resistência inicial [16].

Figura 5: Resistência à compressão e Módulo de elasticidade



Fonte: Autor.

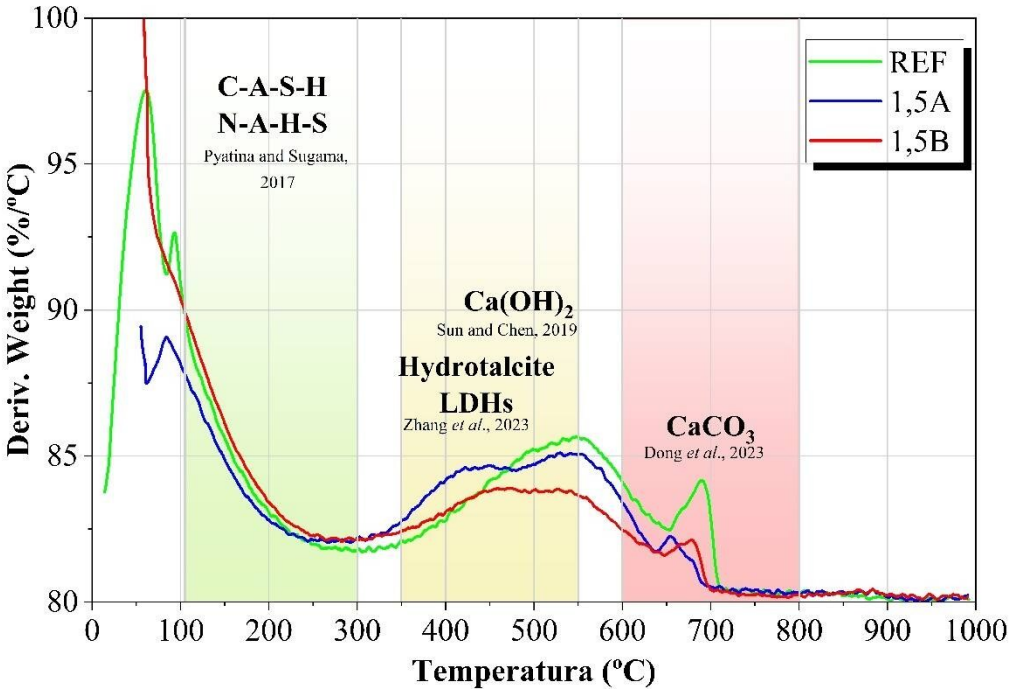
ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG) E ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

Na análise termogravimétrica (Fig. 5), entre 105 °C e 300 °C, observou-se uma perda gradual de massa relacionada à desidratação dos géis C-A-S-H e N-A-S-H [17]. A faixa 350-550°C representa a desidroxilação de dupla camada (LDHs) [18], atribuído às ligações Si-O-H e a presença de $Ca(OH)_2$ [19]. Por fim, entre 600 °C e 800 °C, verificou-se perda de massa decorrente da decomposição do carbonato de cálcio [20].

No intervalo de 105 °C a 300 °C, a amostra TREF apresentou perda de massa de 4,01%. Com a adição dos aditivos superplastificantes, esses valores foram reduzidos para 3,53% (T1,5A) e 3,94% (T1,5B). Esses resultados podem indicar uma menor decomposição dos géis C-A-S-H e N-A-S-H nesse intervalo, corroborando os dados de resistência à compressão, nos quais as amostras apresentaram redução em função da presença do aditivo superplastificante.

Além disso, a mistura TREF apresentou um pico de decomposição mais intenso na faixa de temperatura entre 600 °C e 800 °C, sugerindo maior presença de fases associadas ao cálcio e à formação de carbonatos. Em contrapartida, os picos das amostras T1,5A e T1,5B apresentaram redução de intensidade, corroborando a diminuição da resistência à compressão (35,54% e 46,00% aos 28 dias).

Figura 6: Análise termogravimétrica (TG)



Fonte: Autor.

Os resultados da espectroscopia de absorção por transformada de Fourier no infravermelho (Fig. 6) complementam e corroboram os resultados da termogravimetria (TG) e resistência à compressão (Fig. 5). O pico em 874 cm-1 é atribuída aos modos de flexão do CO_3^{2-} [21]. O pico em 991 cm-1 corresponde à vibração de estiramento assimétrico da ligação terminal Si–O do SiO_4 (não-ponte), característica dos produtos da reação, sendo considerada a assinatura espectral dos géis C-A-S-H/N-A-S-H formados na matriz [22].

A banda de estiramento O–C–O, observada em 1418 cm^{-1}, característica dos carbonatos [23], foi identificada em todas as amostras. Por fim, os picos na faixa de número de 1645 cm^{-1} correspondem às vibrações de estiramento e flexão do grupo O–H, associadas à presença de água ligada no sistema e nos principais produtos da reação [24].

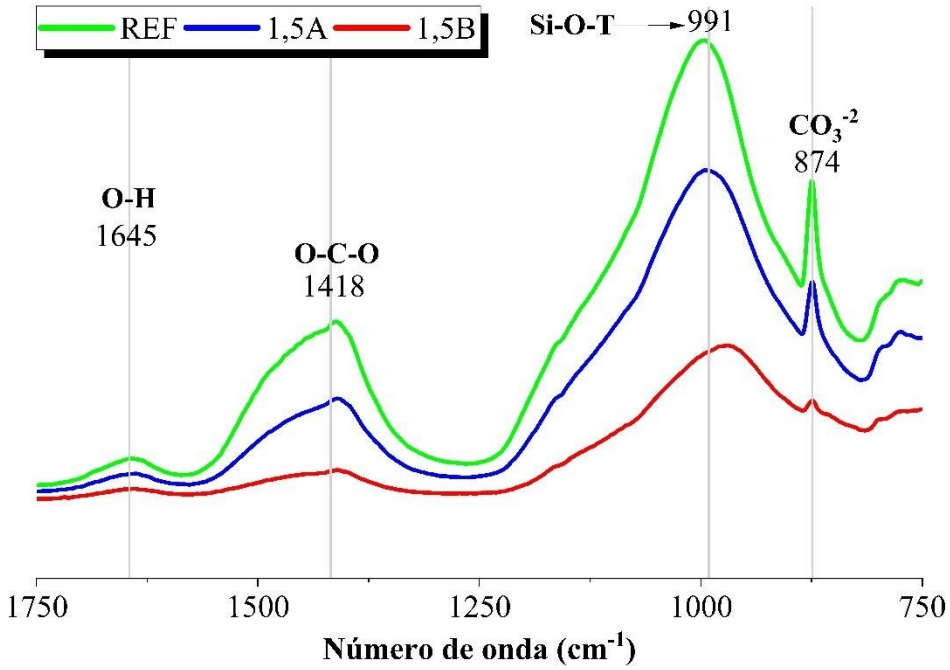
A intensidade das bandas de FTIR está diretamente relacionada à concentração dos grupos funcionais correspondentes, de modo que picos mais altos indicam maior absorção e uma concentração mais elevada dessas ligações [25]. A intensidade desse pico em 991 cm^{-1} apresentou uma correlação direta com os valores de resistência à compressão obtidos. A amostra de referência (TREF), sem a adição de um superplastificante, exibiu o pico mais alto nessa região e atingiu uma resistência à compressão de 41 MPa aos 28 dias.

Em contrapartida, as misturas com aditivos (T1.5A e T1.5B) apresentaram picos menos intensos, refletindo possivelmente a uma formação reduzida de géis C-A-S-H/N-A-S-H e, consequentemente, resistências reduzidas de 26 MPa e 22 MPa, respectivamente. Esse resultado confirma que a diminuição da intensidade espectral está associada a

uma menor densificação da matriz e a uma perda de desempenho mecânico, destacando o impacto dos superplastificantes na cinética da ativação alcalina e nos produtos da reação.

A banda de esticamento O–C–O, observada a 1418 cm^{-1}, característica dos carbonatos [26], foi identificada em todas as amostras. Por fim, os picos na faixa de 1645 cm^{-1} correspondem às vibrações de esticamento e flexão do grupo O–H, associadas à presença de água ligada no sistema e nos principais produtos da reação [27].

Figura 7: Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)



Fonte: Autor.

CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que a combinação de resíduos de cerâmica vermelha (RCV) e escória de alto-forno (EAF) na produção de concreto álcali-ativado é satisfatória, resultando em uma resistência à compressão superior a 40 MPa aos 28 dias. O 'superplastificante A' apresentou melhor desempenho do que o 'superplastificante B', pois sua adição melhorou a trabalhabilidade do concreto, resultando em um diâmetro médio de espalhamento de 72,67 cm. No entanto, isso resultou em uma redução de 35,54% na resistência à compressão e de 48,00% no módulo de elasticidade. A análise termogravimétrica (TG) e a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) corroboraram esses resultados, indicando uma redução na formação de carbonatos ($CaCO_3$) e dos géis C-A-S-H e N-A-S-H nas amostras com aditivo superplastificante.

Em suma, os superplastificantes interferem na cinética da ativação alcalina, alterando os produtos da reação, e quando utilizados em excesso, podem causar segregação ou reduzir a resistência inicial. Assim, o comportamento dos superplastificantes no

concreto álcali-ativado difere significativamente daquele observado no cimento Portland, destacando a necessidade de aditivos específicos para esses sistemas.

Estudos futuros devem não apenas se concentrar no desenvolvimento de aditivos capazes de suportar alta alcalinidade sem se degradarem, garantindo maior estabilidade química e eficiência de dispersão, mas também incluir análises de termogravimetria (TG) e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) ao longo do tempo, para compreender de forma mais detalhada como as reações se desencadeiam e evoluem nas diferentes fases do material.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao projeto intitulado “Melhoramento e valorização de produtos cerâmicos do APL Cerâmica Vermelha do Baixo Jaguaribe/CE”, financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, processo nº 409236/2022-5.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, todos os autores utilizaram ferramentas de inteligência artificial para verificação textual da língua portuguesa. Após a utilização dessas ferramentas, os autores revisaram, editaram e validaram todo o conteúdo produzido, assumindo total responsabilidade pelo conteúdo final do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] Carvalho, I. de C., Oliveira, G. T. de, Kirchheim, A. P., Costa, H. N. da, & Cabral, A. E. B. (2024). 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, 21, e03681. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03681

[2] ARAOS, P.; APONTE, D.; BARRA, M. Ladle furnace slag as a new source of supplementary cementitious material: Evaluating long-term performance and environmental impact in Portland cement systems. Journal of Building Engineering, v. 95, p. 109995, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109995

[3] M.F. Alnahhal, T. Kim, A. Hajimohammadi, Distinctive rheological and temporal viscoelastic behaviour of alkali-activated fly ash/slag pastes: a comparative study with cement paste, Cement Concr. Res. 144 (2021) 106441, https://doi.org/ 10.1016/j.cemconres.2021.106441.

[4] Micael Rubens Cardoso da Silva, Ivo de Castro Carvalho, Laura Silvestro, Lei Lei, Ana Paula Kirchheim, Brant Walkley, Advances in understanding the mechanisms of particle dispersion and performance of superplasticisers in alkali-activated materials – a systematic literature review, Cement and Concrete Composites,Volume 166,2026,106360,ISSN 0958-9465,https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.106360.

[5] Criado, María; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, Ana; Palomo, Ángel. Alkali activation of fly ash: Effect of the SiO_2/Na_2O ratio. Part I: FTIR study. Microporous and Mesoporous Materials, v. 106, n. 1-3, p. 180-191, nov. 2007. DOI: 10.1016/j.micromeso.2007.02.055

[6] J. Chen, J. Plank, Which factors impact the effectiveness of PCEs in alkali-activated slag cements? Cement Concr. Res. 190 (2025) 107807 https://doi.org/10.1016/j. cemconres.2025.107807.

[7] A. Kashani, J.L. Provis, J. Xu, A.R. Kilcullen, G.G. Qiao, J.S.J. van Deventer, Effect of molecular architecture of polycarboxylate ethers on plasticizing performance in alkali-activated slag paste, J. Mater. Sci. 49 (2014) 2761–2772, https://doi.org/ 10.1007/s10853-013-7979-0.

[8] Mendonça, I. V., Damasceno, M. M. G., Barros, E. P. A. P., Costa, H. N., & Cabral, A. E. B. (2025). Uso de aditivos plastificantes em pastas álcali-ativadas: estudo na mistura binária de resíduo de cerâmica vermelha e escória de alto forno. In II Simpósio Brasileiro de Ciência do Cimento.

[9] RAFEET, Ali; VINAI, Raffaele; SOUTSOS, Marios; SHA, Wei. Guidelines for mix proportioning of fly ash/GGBS based alkali activated concretes. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 147, p. 130-142, ago. 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.036.

[10] Lucas B.R. Araújo, Madson L. de Souza, Abcael R.S. Melo, Heloina N. Costa, Lucas F.A.L. Babadopulos, Antonio E.B. Cabral, Rafael G. Pileggi, High-strength self-compacting alkali-activated concrete produced with fly ash and steel slag: rheological behavior and mixing rheology comparisons with a Portland cement concrete, CEMENT, Volume 22, 2025, 100156, ISSN 2666-5492, https://doi.org/10.1016/j.cement.2025.100156.

[11] PILEGGI, R. Comportamento no estado fresco e no estado endurecido de argamassas álcali-ativadas à base de cinza volante curadas em temperatura ambiente. Matéria (Rio J.), v. 27, n. 3, 2022. DOI: 10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0060

[12] Melo, Abcael & De Souza, Madson & Cavalcante, Caio & Ripardo, Thayná & Babadopulos, Lucas. (2024). Análise comparativa de propriedades reológicas e mecânicas de diferentes tipos de concreto.

[13] Nicolas Roussel, Rheological requirements for printable concretes, Cement and Concrete Research, Volume 112, 2018, Pages 76-85, ISSN 0008-8846, https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.005

[14] POTLURI ANUDEEP; REDDY, M. Achyutha Kumar; KHED, Veerendrakumar C.; ADAMU, Musa; VARALAKSHMI, Mada; IBRAHIM, Yasser E.; AHMED, Omar Shabbir. Effect of superplasticizer in geopolymer and alkali-activated cement mortar/concrete: A review. Reviews in Advanced Materials Science, v. 63, n. 1, 2024. DOI: 10.1515/rams-2023-0173.

[15] de Hita, M.J., Criado, M., 2023. Influence of superplasticizers on the workability and mechanical development of binary and ternary blended cement and alkali-activated cement. Construction and Building Materials, 366, 130272. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130272

[16] Puertas, Francisca; Palomo, Ángel; Fernández-Jiménez, Ana; Izquierdo, J. D. Effect of superplasticisers on the behaviour and properties of alkaline cements. Advances in Cement Research, v. 15, n. 1, p. 23-28, jan. 2003. DOI: 10.1680/adcr.15.1.23.36730

[17] PYATINA, T.; SUGAMA, T. Role of tartaric acid in chemical, mechanical and self-healing behaviors of a calcium-aluminate cement blend with fly ash F under steam and alkali carbonate environments at 270 °C. Materials, v. 10, n. 4, art. 342, 2017. DOI: https://doi.org/10.3390/ma10040342

[18] X. Zhang, B. Wang, J. Chang, L. Shen, T. Li, X. Han, Z. Liu, Effect of curing temperatures on geopolymerization and heavy metal solidification in alkali-activated zeolite/MSWI fly ash specimens, Constr. Build. Mater. 393 (2023) 132152, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132152.

[19] SUN, J.; CHEN, Z. Effect of silicate modulus of water glass on the hydration of alkali-activated converter steel slag. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 138, p. 47–56, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s10973-019-08146-3

[20] DONG, T.; SUN, T.; XU, F.; OUYANG, G.; WANG, H.; YANG, F.; WANG, Z. Effect of solid sodium silicate on workability, hydration and strength of alkali-activated GGBS/fly ash paste. Coatings, v. 13, n. 4, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/coatings13040696

[21] Muthuvel I, Gowthami K, Thirunarayanan G, Suppuraj P, Krishnakumar B, Do NascimentoSobral AJF, Swaminathan M (2019) Graphene oxide–Fe2V4O13 hybrid material as highly effi cient hetero-Fenton catalyst for degradation of methyl orange. Int J Ind Chem 10:77–87. https:// doi. org/ 10. 1007/ s40090- 019- 0173-8

[22] GAIBOR, N.; LEITÃO, D.; MIRANDA, T.; CRISTELO, N.; FERNANDES, L.; PEREIRA, E. N. B.; CUNHA, V. M. C. F. Fiber reinforced alkali activated cements from ceramic waste and ladle furnace slag without thermal curing. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 35, n. 7, p. 1–12, 2023. DOI: https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-14776

[23] M. Criado, A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, Alkali activation of fly ash: Effect of the SiO2/Na2O ratio: Part I: FTIR study, Microporous and Mesoporous Materials, Volume 106, Issues 1–3, 2007, Pages 180-191, ISSN 1387-1811, https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.02.055.

[24] S.C. Gomes, Q.D. Nguyen, W. Li, A. Castel, Carbonation resistance of calcined clay-ground granulated blast furnace slag alkali-activated mortar, Constr. Build. Mater. 393 (2023) 131811, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131811.

[25] J. Shen, Y. Li, H. Lin, J. Lv, S. Feng, J. Ci, Early properties and chemical structure analysis of alkali-activated brick geopolymer with varied alkali dosage, J. Build. Eng. 60 (2022), https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105186.

[26] Cuifang Lu, Zuhua Zhang, Caijun Shi, Ning Li, Dengwu Jiao, Qiang Yuan, Rheology of alkali-activated materials: A review, Cement and Concrete Composites, Volume 121, 2021, 104061, ISSN 0958-9465, https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104061.

[27] Tekle, B. H., Hertwig, L., & Holschemacher, K. (2021). Rheology of Alkali-Activated Blended Binder Mixtures. Materials, 14(18), 5405. https://doi.org/10.3390/ma14185405