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

Compostos na ativação alcalina em sistemas binários entre resíduos cerâmicos e escória de alto forno

Compounds in alkaline activation in binary systems between ceramic waste and blast furnace

Flávia Müller Grigoleto
CEFET MG | Belo Horizonte | Brasil | grigoletoflavia@gmail.com
André Guilherme Martins Costa
CEFET MG | Belo Horizonte | Brasil | andreguimcosta@gmail.com
Augusto Cesar da Silva Bezerra
CEFET MG | Belo Horizonte| Brasil | augustobezerra@cefetmg.br

Resumo

Os resíduos cerâmicos, constituídos de silício e alumínio, apresentam potencial para utilização no desenvolvimento de materiais álcali-ativados e a escória granulada de alto forno pode ser fonte de cálcio, compondo sistemas binários. Nesta pesquisa foram avaliadas as pastas elaboradas pela álcali-ativação de pó reciclado de tijolos (PRT) combinado com escória granulada de alto-forno (EGAF) e solução ativadora de hidróxido de sódio. Os precursores foram caracterizados e após moldagem e cura das pastas em temperatura ambiente, os ensaios de resistência à compressão, DRX, MEV e FTIR validaram a ocorrência de ativação alcalina nas formulações propostas para idades de 28 dias e 91 dias. A pasta PRT50EGAF50 apresentou a maior resistência à compressão dentre as amostras analisadas (58,39MPa, aos 91 dias). A formação de matrizes densas e coesas identificadas nas micrografias, o surgimento do halo entre 28º e 30º na DRX, além do deslocamento das bandas FTIR em direção a números de onda mais baixos podem ser relacionados à presença de géis amorfos, como o CASH, CSH e NASH, indicando ativação efetiva dos aluminossilicatos dos resíduos em estudo.

Palavras-chave: Resíduos cerâmicos. Escória de alto forno. Ativação alcalina. Cura em temperatura ambiente.

Abstract

Ceramic waste, made up of silicon and aluminum, has the potential for use in the development of alkali-activated materials, and granulated blast furnace slag can be a source of calcium that composes binary systems. This research evaluated pastes made by alkali-activation of recycled brick powder (RBP) combined with granulated blast furnace slag (GBFS) and sodium hydroxide activating solution. The precursors were characterized, and after molding and curing the pastes at ambient temperature, compression resistance, XRD, SEM, and FTIR tests validated the occurrence of alkaline activation in the formulations proposed for ages 28 days and 91 days. The PRT50EGAF50 paste presented the highest compressive strength among the samples analyzed (58.39MPa, at 91 days). The formation of dense and cohesive matrices identified in the micrographs, the appearance of the halo between 28º and 30º in XRD, in addition to the

Como citar:
GRIGOLETO, Flávia Müller; MARTINS COSTA, André Guilherme Martins Costa; DA SILVA BEZERRA, Augusto Cesar. Compostos na ativação alcalina em sistemas binários entre resíduos cerâmicos e escória de alto forno. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

displacement of the FTIR bands towards lower wavenumbers, can be related to the presence of amorphous gels, such as CASH, CSH and NASH, indicating effective activation of the aluminosilicates of the residues under study.

Keywords: Ceramic waste. Blast furnace slag. Alkaline activation. Ambient temperature curing.

INTRODUÇÃO

Para produção de materiais álcali-ativados (MAA), a maioria dos materiais cimentícios alternativos baseados em aluminossilicatos podem ser usados como precursores e bons resultados já foram apresentados [1] para escórias de alto forno, cinzas volantes, [2] argilas calcinadas e pozolanas naturais. Outros materiais menos convencionais têm sido utilizados como precursores na literatura, como argilas ricas em ferro, lama vermelha [3][4], resíduos da laminação de vidro [5] e outras cinzas volantes [6][7]. Como ativadores, os compostos mais utilizados são hidróxidos (MOH) e silicatos ($M2O{\cdot}SiO_2$) onde M pode ser sódio (Na) ou potássio (K). São exemplos tradicionais de adições reativas: a sílica ativa, as argilas calcinadas como o metacaulim, as pozolanas naturais, a cinza de casca de arroz, a cinza de bagaço de cana-de-açúcar e a cinza volante [8].

A geração de pós [9] é algo corriqueiro na fabricação de agregados (atividade de uso mais comum de resíduos da construção civil (RCC)) e na fabricação de estruturas e componentes construtivos, tornando-se essencial o estudo de destinações para essa fração pulverulenta do material.

Somados aos quesitos ambientais, é necessário que estas adições apresentem propriedades mecânicas e físico-químicas que admitam a sua utilização. A análise microestrutural desses compósitos demonstra que concretos, argamassas e pastas elaborados a partir de resíduos industriais, podem apresentar resistência à compressão, densidade, permeabilidade e durabilidade (resistência à carbonatação e ao ataque de ácidos) equivalentes a aqueles feitos com concretos, argamassas e pastas de cimento Portland [10].

Os resíduos cerâmicos podem ter origem no resíduo de construção e demolição e no descarte de peças defeituosas em olarias. Apresentam vários potenciais de utilização, principalmente em se tratando da produção de subprodutos da construção civil como argamassas e concretos, cujos estudos verificam uma atividade pozolânica e o efeito de preenchimento - filer destes materiais. Podem ser ainda, utilizados como material de base ou sub-base em pavimentação, assim como ser (com algumas restrições) reaproveitados no próprio processo de produção da indústria cerâmica e como agregados reciclados [11]. Frente ao volume de geração e às características físicas e químicas (serem fonte de silício e alumínio e constituídos por grande quantidade de fases amorfas e vítreas), o PRT se mostra como um potencial precursor para o desenvolvimento de MAA.

A combinação de geopolímeros com resíduos cerâmicos é promissora para diminuir a energia e custo dos materiais no setor da construção [12] apesar dos RCC serem ainda majoritariamente utilizados como agregados reciclados. Pouca atenção tem sido dada às frações finas e ultrafinas destes resíduos, e soma-se o fato que o uso dessas frações

de RCC como precursores AA não é bem compreendido, principalmente devido à rapidez da reação e à simultaneidade de suas etapas.

A escória de alto forno é um material cuja formação se dá na produção do ferro gusa, onde se a escória é resfriada lentamente ao ar, os componentes químicos do material apresentam geometria cristalina, que não reagem com a água a temperatura ambiente e será fracamente cimentícia e pozolânica. No entanto, quando a escória líquida é rapidamente resfriada, a maior parte da cal, magnésia, sílica e alumina são mantidas em estado não cristalino (ou vítreo), sendo assim reativa de maneira análoga às pozolanas [13]. A escória álcali-ativada ganhou atenção devido aos benefícios como menor calor de hidratação, menor emissão de CO_2, alto desempenho mecânico em idades iniciais, alta resistência ao ataque químico [14].

O processo de geopolimerização pode ocorrer por dissolução de matérias-primas contendo aluminossilicato em soluções alcalinas. Este processo leva à formação de monômeros de aluminato e silicato. Estes são então convertidos em oligômeros e posteriormente aos geopolímeros. A água é consumida durante a dissolução e liberada na polimerização. De maneira geral, a sintetização desta estrutura baseia-se no compartilhamento de átomos de oxigênio entre unidades tetraédricas de $[SiO_4]$– e $[AlO_4]$–, formando ligações do tipo Si-O-Al-O. Essa substituição do Si^{4+} pelo Al^{3+} nos locais de cadeia tetraédrica gera um excesso de carga negativa, que é balanceada por cátions alcalinos (como o Na+, K+, Mg^{2+} e Ca^{2+}) que se alojam nas cavidades da estrutura [1][15].

Neste contexto, o presente trabalho buscou contribuir com a reciclagem e o reaproveitamento de RCC em MAA e para isso, foram estudadas as propriedades químicas, térmicas e físicas adquiridas por pastas álcali-ativadas formadas pela ativação de pó reciclado de tijolos (PRT) e de escória-granulada de alto-forno (EGAF) em sistemas binários que mixam estes resíduos.

MATERIAIS E MÉTODOS

MATERIAIS

A preparação do PRT se deu através de moagem, secagem e otimização da granulometria de tijolos cerâmicos que passaram inicialmente por britagem em um triturador de mandíbulas. Na sequência, os particulados obtidos foram secos e colocados em moinho de bolas metálicas com câmara de moagem em aço 1020, por um período de dez horas. Foram utilizadas 90 esferas moedoras de aço cromo de 30mm em rotação de 90rpm para garantir que a granulometria do PRT estivesse na mesma escala de grandeza de um aglomerante comercial. A EGAF utilizada foi fornecida pela empresa Supermix Concreto, e as amostras após secas passaram por moagem no moinho de bolas metálicas com câmara de moagem em aço 1020, por um período de oito horas.

O ativador alcalino escolhido para este estudo foi o Hidróxido de Sódio P.A. (97%) em lentilhas, comercializado pela Êxodo Científica Química Fina Indústria e Comércio Ltda

sob o CAS no 1310-73-2, com peso molar 40,00g. O trabalho se desenvolveu com solução alcalina de concentração 8 mol/L produzida sempre na data anterior da síntese dos corpos de prova, para evitar que o calor liberado no processo exotérmico de dissolução de NaOH influenciasse na cinética das reações [16]. A relação ativador/precursor para todas as dosagens foi fixada em 0,55 (razão entre massa de solução ativadora e massa do resíduo precursor em pó) uma vez que foi o índice com melhor trabalhabilidade das pastas produzidas.

MÉTODOS

Partiu-se de duas pastas iniciais (numeradas de 1 a 2) com proporções contendo 100% de cada um dos dois resíduos estudados e solução ativadora. Depois em sistemas binários mesclando os PRT e EGAF em percentuais variando entre 25% e 75% em massa nas duas molaridades (pastas numeradas de 3 a 5) conforme ilustrado na Tabela 1. O desmolde foi realizado em 24h com os corpos de prova acondicionados na sequência dentro de embalagens plásticas com tampa até atingirem as idades de cura em temperatura ambiente (24°C ± 5°C). Foram produzidos 20 corpos de prova 25mm x 50mm para cada uma das misturas, que totalizaram 100 CP para as 5 formulações de pastas álcali-ativadas. As misturas foram realizadas por 3min em misturador mecânico – argamassadeira planetária - até obtenção de pastas homogêneas.

Tabela 1: Composição das misturas das pastas

Pasta	Identificação	PRT (%)	EGAF (%)
1	PRT100 8M	100	0
2	EGAF100 8M	0	100
3	PRT75 EGAF25 8M	75	25
4	PRT50 EGAF50 8M	50	50
5	PRT25 EGAF75 8M	25	75

Fonte: autoria própria

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 28 dias e 91 dias de cura em temperatura ambiente, seguindo normas para materiais cimentícios [17], uma vez que ainda não há normatização específica para MAA. Com a intenção de avaliar o desenvolvimento da ativação alcalina, as amostras das pastas curadas passaram por análises de DRX, MEV e FTIR. Estas análises foram realizadas em idades de cura avançadas, de 100 dias, com o intuito de avaliar as amostras com certa estabilidade química, já que há pouca variação significativa nas propriedades após 100 dias de idade [18]. Dois corpos de prova de cada dosagem foram serrados em três frações menores, de aproximadamente 25mm x 15mm cada, sendo estas levadas a estufa em temperatura de 60°C por 24h. As etapas de preparação das amostras para estes ensaios, ainda incluíram moagem manual com almofariz e pistilo de porcelana. Houve polimento de amostras em lixadeira politriz metalográfica de bancada Risitec PLR-II 300rpm, com pasta de alumina para preparação ao MEV.

Como o tempo de reação está correlacionado com a temperatura, a concentração do ativador alcalino, o precursor e ao ativador [19], o regime de cura tem um impacto muito significante nas propriedades físicas e químicas de materiais ativados alcalinamente [20]. Assim, é importante observar que a taxa de reação de ativação

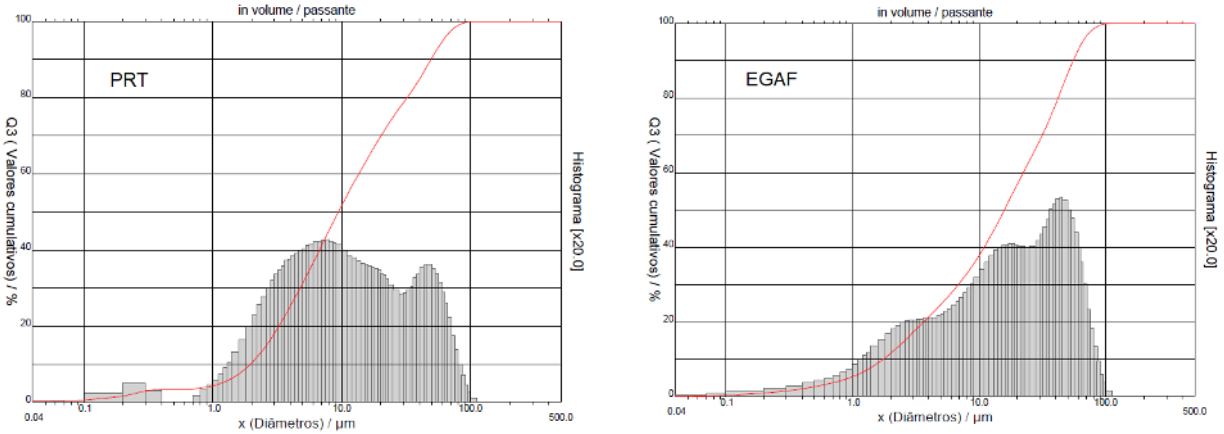
depende de vários outros fatores tais como a distribuição do tamanho de partículas, a composição mineral do material precursor, assim como, o tipo e a concentração do ativador [21].

RESULTADOS E DISCUSSÕES

PRECURSORES

Os resultados da análise granulométrica e as curvas granulométricas são apresentadas na Figura 1 e o Quadro 1 transcreve a distribuição do tamanho das partículas dos quatro resíduos estudados.

Figura 1: Granulometria dos resíduos PRT e EGAF



Fonte: autoria própria

Quadro 1: Tamanho das partículas dos resíduos (µm).

MATERIAIS	Dm	D10	D50	D90
PRT	17,91	1,95	9,42	49,22
EGAF	22,92	1,75	15,78	55,10

Fonte: autoria própria

No Quadro 2 são apresentados os resultados de composição química, obtidos pelo ensaio de fluorescência de raios X (FRX), realizado em equipamento da marca Bruker, modelo S2 Ranger e permitiram a quantificação dos óxidos presentes nos resíduos utilizados.

Quadro 2 – Composição química dos resíduos utilizados

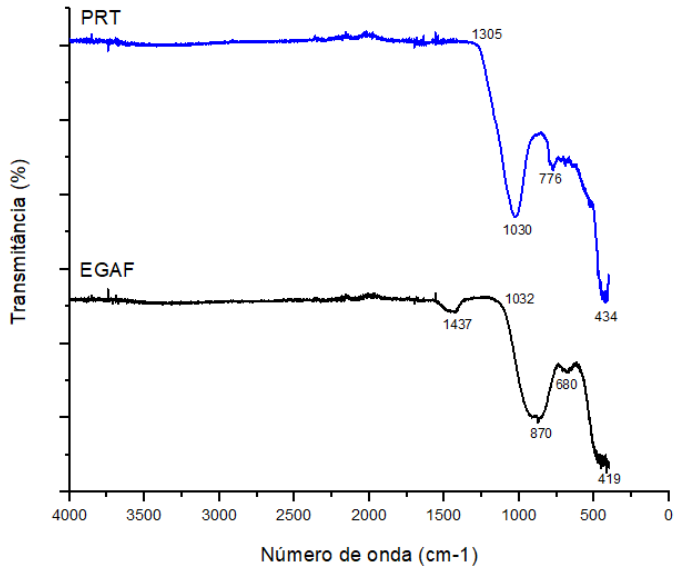
MATERIAL	SiO_2	K_2O	Fe_2O_3	CaO	Al_2O_3	P_2O_5	TiO_2	Na_2O	SO_3	MgO	Outros Óxidos
PRT	65,90	2,54	7,19	0,28	21,86	0,11	0,57	0,66	0,13	0,64	0,12
EGAF	32,05	0,17	1,27	39,46	14,33	0,01	0,53	0,96	1,43	8,77	1,02

Fonte: autoria própria

Os principais óxidos presentes no PRT são SiO_2 e Al_2O_3 comprovando serem fontes de aluminossilicatos e serem precursores viáveis de MAA [21]. Já para a EGAF há predominância dos óxidos CaO e SiO_2 confirmando a possibilidade de este resíduo ser fonte de cálcio reagente no sistema para MAA.

Os resultados obtidos na análise de FTIR para os resíduos estão apresentados nos espectros na Figura 2 com a identificação dos principais picos.

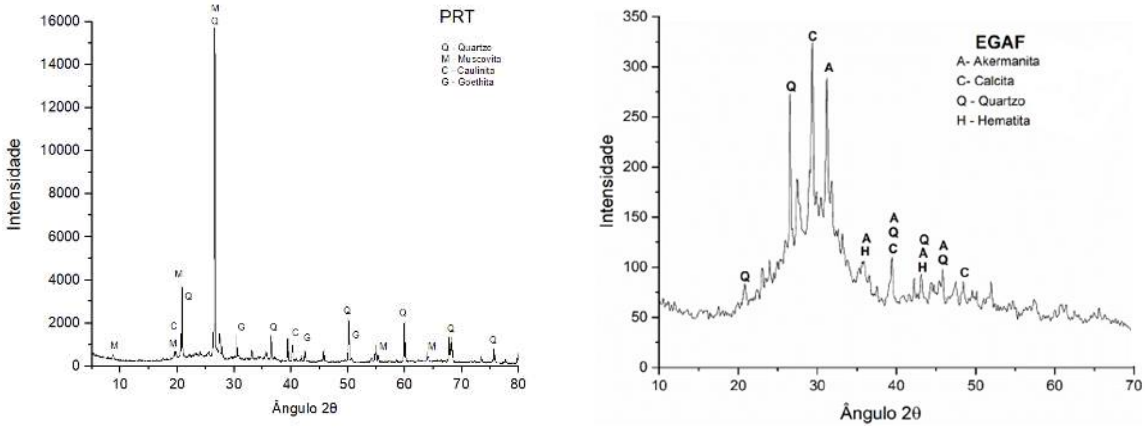
Figura 2: Espectros de FTIR dos resíduos



Fonte: autoria própria

Os difratogramas estão representados na Figura 3. Presente em todos os difratogramas, o halo caracteriza a existência de estruturas não cristalinas, passível inclusive de atividade pozolânica.

Figura 3: Difração de raios X de uma amostra de cada resíduo (PRT e EGAF)



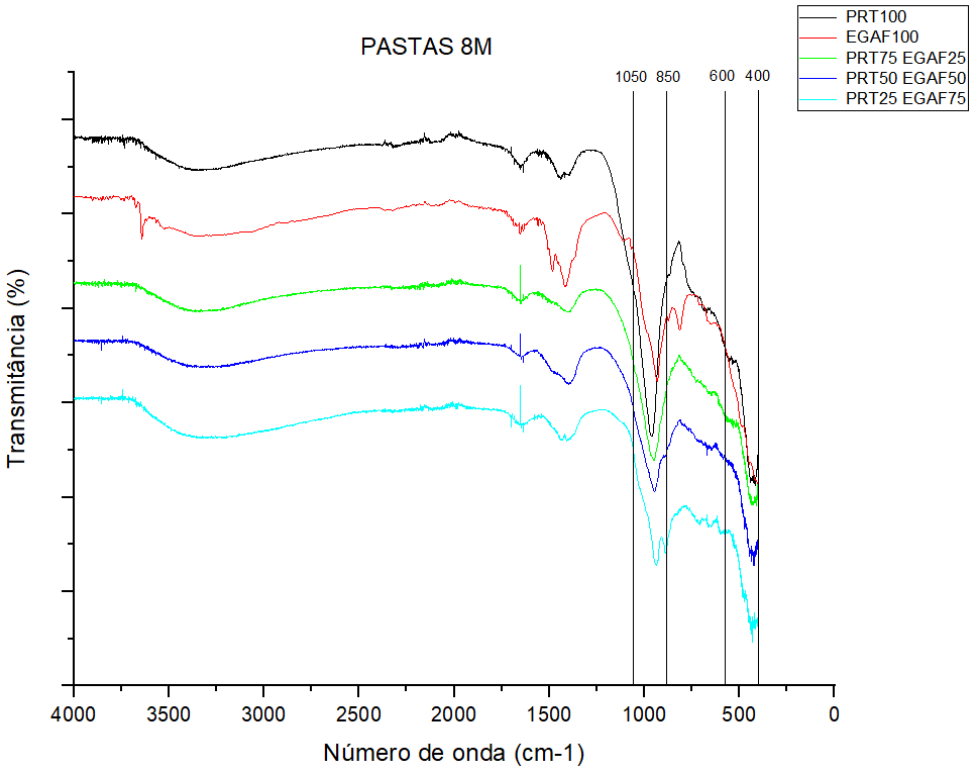
Fonte: autoria própria

PASTAS AA

Nos espectros de FTIR característicos dos géis já foram apresentados em outras pesquisas de sistemas compostos pelos géis tipos N-A-S-H e C-A-S-H [23], destaca-se a banda principal em torno de 1000cm^{-1}, atribuída à vibração do alongamento assimétrico da ligação Si-O (Uas Si-O-Si), a qual está em torno de 955cm^{-1} para o CASH, e 1020cm^{-1} para NASH. Além disso, autores pontuam que há uma diminuição gradual na posição das bandas de absorção principais em direção à região relacionada ao CASH, em torno de 960cm^{-1}, quando analisaram a evolução com o tempo do sistema

de mistura composto pelos géis NASH e CASH. Nesta pesquisa, os espectros FTIR permitiram identificar o surgimento de produtos de reação de álcali-ativação. Nota-se que a maioria das amostras de pastas aos 100 dias de cura (Figura 4) apresentaram um espectro FTIR muito similar ao espectro característico do gel tipo CASH. A exceção compreende somente as amostras da pasta PRT100 que se assemelha mais ao espectro característico do gel tipo NASH.

Figura 4: Espectros de FTIR para as pastas AA 8M (a) aos 100 dias

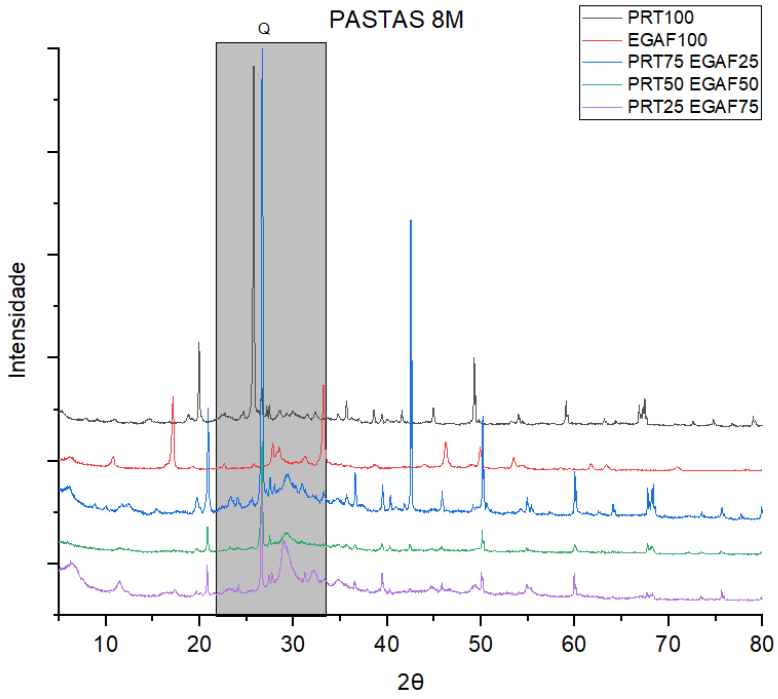


Fonte: autoria própria

Nota-se que a banda próxima a 775cm-^{1}, presente no PRT (Figura 3), não está mais presente nas pastas, possivelmente em razão da dissolução das ligções Si-O, atribuída a essa região. Percebe-se também que a banda 900 cm^{-1} a 1200cm^{-1} deslocou-se em direção a números de onda mais baixos, quando comparadas aos precursores. Este deslocamento indica um alongamento da ligação Si-O-T (T: Al ou Si) e redução no ângulo de ligação, provocado possivelmente pela substituição do Si^{4+} por Al^{3+}; uma vez que a ligação Al-O é mais fraca e mais longa que a ligação Si-O [22][24]. A banda principal na região 960cm^{-1} e as bandas localizadas em números de ondas inferiores (600 cm^{-1} a 400cm^{-1}) são associadas à formação dos géis CASH e CSH [23].

As análises de DRX para as pastas AA 8M (Figura 5) apontam picos cristalinos relacionados à presença majoritária de quartzo, calcita, muscovita e anatásio. Segundo alguns estudos, o surgimento do halo entre 28º e 30º nas amostras analisadas pode ser relacionado à presença de géis amorfos, como o CASH, CSH e NASH [25][26], conforme também sugerido pelas análises de FTIR das amostras AA.

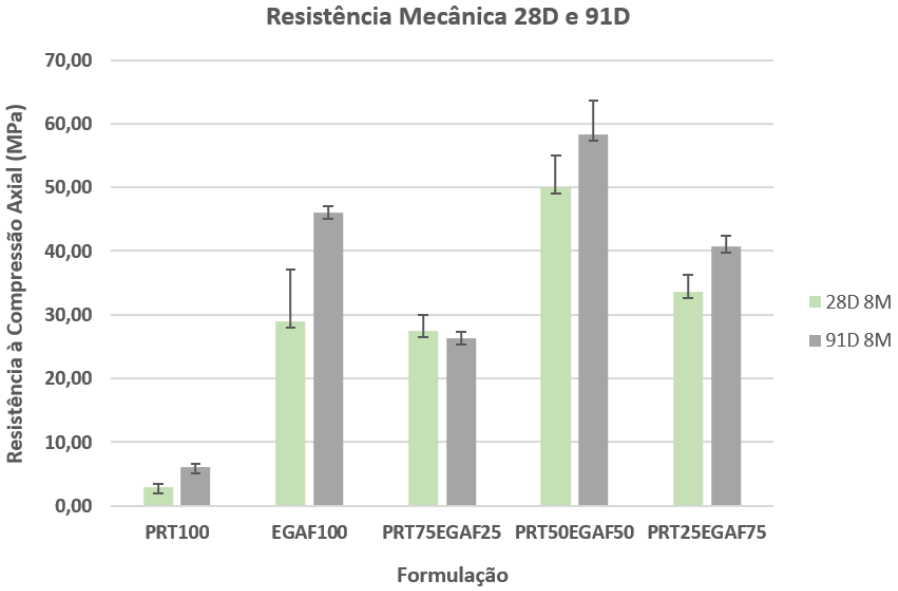
Figura 5: Espectros de DRX para as pastas AA 8M aos 100 dias



Fonte: autoria própria

A resistência à compressão média de cinco ensaios com seus respectivos desvios padrão das pastas elaboradas após 28 dias e 91 dias de cura em temperatura ambiente (24ºC ± 5°C) são apresentados na Figura 6 e foram compilados na Tabela 2. Nota-se ganho de resistência mecânica dependente do tempo de cura e atingiram os maiores valores aos 91 dias.

Figura 6: Resistência à compressão axial (MPa) aos 28 dias (a) e aos 91 dias (b) para as pastas álcali-ativadas



Fonte: autoria própria

Tabela 2: Resultados da resistência à compressão axial (RCm, MPa) das pastas álcali-ativadas e os respectivos desvios padrão (DP)

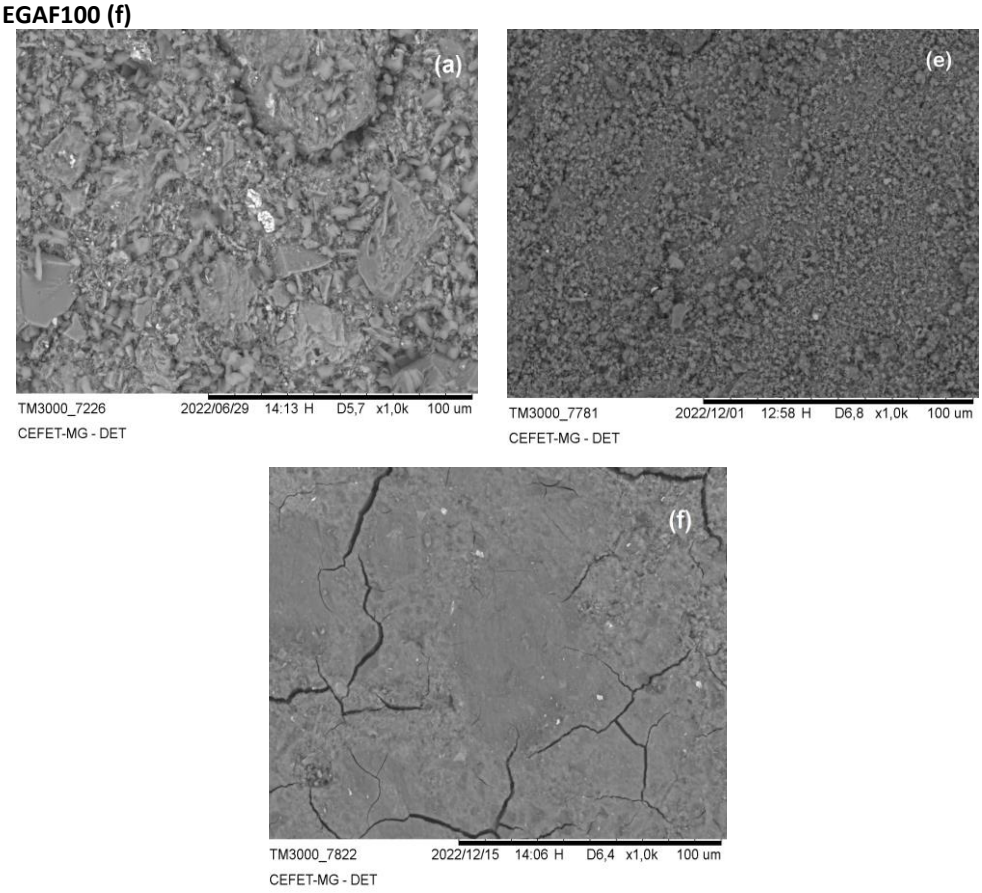
Pasta	Identificação	RCm 28d	DP	RCm 91d	DP
1	PRT100 8M	2,99	0,51	6,11	0,44
2	EGAF100 8M	28,95	8,24	46,00	1,06
3	PRT75 EGAF25 8M	27,47	2,58	26,27	0,98
4	PRT50 EGAF50 8M	50,02	4,93	58,39	5,26
5	PRT25 EGAF75 8M	35,88	2,69	40,81	1,56

Fonte: autoria própria

Apesar de não haver um consenso e uma padronização em relação à identificação dos géis de aluminossilicatos característicos de MAA por meio de micrografias obtidas por MEV, salienta-se formação de matrizes densas e coesas identificadas nas formulações binárias representadas nas micrografias da Figura 7, indicando ser rede polimérica típica de MAA [27].

Nas imagens obtidas para as amostras das pastas 8M PRT100 e EGAF100 observa-se a presença de uma quantidade de vazios, possivelmente provenientes não total expulsão de ar durante a moldagem. São observadas também quantidades significativas de microfissuras, possivelmente provenientes do processo de corte dos CP em frações menores.

Figura 7: Micrografias obtidas por MEV das pastas AA 8M: PRT100(a), PRT50EGAF50(e) e EGAF100 (f)



Fonte: autoria própria

CONCLUSÃO

Todas as pastas elaboradas nesta pesquisa tiveram caráter homogêneo e viscoso (que indicam ser capazes de aglutinar agregados usuais), endureceram em curto espaço de tempo (com desmolde em 24h, formando materiais compactos) além de terem comportamento mecânico satisfatório. Nota-se que ao promover a álcali-ativação e a cura em temperatura ambiente, as cinco pastas elaboradas nesta pesquisa apresentaram propriedades físicas e mecânicas que favorecem sua utilização em muitas áreas da indústria da construção civil, com níveis compatíveis aos de materiais cimentícios a base de CPC.

Nas pastas com a combinação binária de resíduos houve uma notável melhora nos valores de resistência à compressão comparativamente aos valores dos resíduos utilizados isoladamente na ativação alcalina, chegando a valores bem mais expressivos. Isto porque rejeitos e subprodutos industriais ricos em aluminossilicatos podem ser misturados a fontes de cálcio mais reativas, possibilitando a álcali-ativação de melhor maneira comparando quando são ativados sozinhos.

Os materiais nas formulações propostas apresentaram um ganho de resistência mecânica dependente do tempo de cura e atingiram os maiores valores aos 91 dias, com a solução ativadora de NaOH concentração 8M. O valor mais alto foi da formulação PRT50EGAF50 (média de 58,39MPa aos 91 dias).

Atesta-se que esta pesquisa contribuiu para a valorização da utilização destes resíduos como precursores de MAA através da formação de matrizes densas e coesas identificadas nas micrografias, o surgimento do halo entre 28º e 30º na DRX, além do deslocamento das bandas FTIR em direção a números de onda mais baixos e que podem ser relacionados à presença de géis amorfos, como o CASH, CSH e NASH, indicando ativação efetiva dos aluminossilicatos.

Analisar a cinética das reações através de calorimetria é uma sugestão futura de abordagem, a fim de coletar informações importantes sobre a dinâmica de formação dos MAA através das reações térmicas. O desenvolvimento de MAA em uma parte, onde o ativador ainda sólido é misturado ao precursor, para que o consumidor final tenha apenas que adicionar água à mistura, seria também uma ótima continuidade de estudos com uso de resíduos.

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] PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. **Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials.** Annual Review of Materials Research, v. 44, n. 1, p. 299–327, 2014.

[2] GIANNOPOULU, I. Et al. **Mechanical behavior of construction and demolition waste-based alkali activated materials exposed to fire conditions**, Construction and Building Materials, v 415, 2024.

[3] YE, N. et al. **Synthesis and strength optimization of one-part geopolymer based on red mud**. Construction and Building Materials. v 111, 317–325, 2016.

[4] LEMOUGNA, P.N.; WANG, K.-T.; TANG, Q.; CUI, X.-M. **Synthesis and characterization of low temperature (<800 C) ceramics from red mud geopolymer precursor**. Construction and Building Materials. V.131, 564–573, 2017.

[5] FAGUNDES, J. T. **Obtenção e caracterização de geopolímero a partir da lama vermelha "in natura" e do resíduo da fabricação de vidros planos.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Construções, Ouro Preto, 2019.

[6] ZHANG, Y.; LIU, L. **Fly ash-based geopolymer as a novel photocatalyst for degradation of dye from wastewater**. Particuology, v. 11, n. 3, p. 353–358, 2013.

[7] NOVAIS, R. M. et al. **Synthesis of porous biomass fly ash-based geopolymer spheres for efficient removal of methylene blue from wastewaters**. Journal of Cleaner Production, v. 207, p. 350–362, 10 jan. 2019.

[8] PROVIS, J. L. **Alkali-activated materials**. Cement and Concrete Research, v. 114, p. 40–48, dez. 2018.

[9] ILCAN, H. et al. **Low-alkaline activated construction and demolition waste-based geopolymers.** Construction and Building Materials, v411, 2024.

[10] BERNAL, S. A. et al. **Mechanical and thermal characterisation of geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends.** Journal of Materials Science, v. 46, n. 16, p. 5477–5486, 2011a.

[11] BREKAILO et al. **Avaliação do potencial reativo de adições de resíduos de blocos de cerâmica vermelha e de concreto cominuído de RCD em matriz cimentícia.** Cerâmica. v 65, 2019.

[12] LUHAR, I. et al. **Assessment of the Suitability of Ceramic Waste in Geopolymer Composites: An Appraisal**. Materials v. 14, no. 12: 3279, 21 jun.2021.

[13] METHA, P.M.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo, 2ª. ed., 2014, 751p.

[14] DUAN, W. et al. **Mitigation of alkali-silica reaction in blast-furnace slag-based alkaline activated material through incorporation of alum water treatment residue.** Construction and Building Materials, v406, 2023.

[15] ZHANG, M.; DESKINS, N.A.; ZHANG, G.; CYGAN, R.T.; TAO, M. **Modeling the Polymerization Process for Geopolymer Synthesis through Reactive Molecular Dynamics Simulations**. The Journal of Physical Chemistry. C 122 ,6760–6773, 2018.

[16] ZHANG, Z. et al. **Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 1. The activation of metakaolin with sodium hydroxide**. Thermochimica Acta, v. 539, p. 23–33, 2012.

[17] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2019.

[18] SUN, Z.; VOLLPRACHT, A. **Isothermal calorimetry and in-situ XRD study of the NaOH activated fly ash, metakaolin and slag.** Cement and Concrete Research, v. 103, p. 110–122, 1 jan. 2018.

[19] CHENG, S., GE, K., SUN, T. **Pozzolanic activity of mechanochemically and thermally activated coal-series kaolin in cement-based materials.** Construction and Building Materials, v. 299, 2021.

[20] MILLER, N. A.; STIRLING, C. D.; NICHOLSON, C. L. **The relationship between cure conditions and flexural properties in flyash-based geopolymers.** Proceedings of the World Congress Geopolymer, Saint Quentin, France, 28 June–1 July, 121–122p., 2005.

[21] FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; PUERTAS, F. **Effect of activator mix on the hydration and strength behaviour of alkali-activated slag cements.** Advances in Cement Research, v. 15, n. 3, p. 129–136, 2003.

[22] DIAZ, A.G.et al. **Improved strength of alkali activated materials based on construction and demolition waste with addition of rice husk ash.** Construction and Building Materials, v. 413, 2024.

[23] GARCIA-LODEIRO, I. et al. **Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na2O–CaO– Al2O3–SiO2–H2O.** Cement and Concrete Research, v. 41, n. 9, p. 923–931, 1 set. 2011.

[24] PALOMO, A. et al. **Alkaline Activation of Fly Ashes: NMR Study of the Reaction Products.** Journal of the American Ceramic Society, v. 87, n. 6, p. 1141–1145, jun. 2004.

[25] YIP, C. K.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. **The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation.** Cement and Concrete Research, v. 35, n. 9, p. 1688–1697, 2005.

[26] SOUZA, L.N.; FIGUEIREDO, P.F.; FRANÇA, S.; SILVA, M.V.S.; BORGES, P.H.R.; BEZERRA, A.C.d.S. **Effect of Non-Calcined Sugarcane Bagasse Ash as an Alternative Precursor on the Properties of Alkali-Activated Pastes.** Molecules, v. 27, p.1185, 2022.

[27] CORDEIRO, G. C. et al. **Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete.** Cement and Concrete Research, v. 39, n. 2, p. 110–115, fev. 2009.