

POTENCIAL USO DE SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA NA PRODUÇÃO DE CIMENTOS ÁLCALI-ATIVADOS

HELOINA NOGUEIRA COSTA¹, EDUARDO BEZERRA CABRAL¹,
RICARDO EMÍLIO FERREIRA QUEVEDO NOGUEIRA¹

¹Universidade Federal do Ceará - UFC
<heloina@ufc.br>, <eduardo.cabral@ufc.br>, <emilio@ufc.br>
10.21439/conexoes.v17i0.2873

Resumo. Os cimentos álcali-ativados têm recebido destaque nos últimos anos. Primeiro, por ser um possível substituto ecológico do cimento Portland. Segundo, pelo potencial uso de materiais residuais locais em sua produção. No entanto, é necessário que esses resíduos correspondam a fontes de aluminossilicatos e tenham a capacidade de formar uma matriz aglomerante ao ser alcalinamente ativados. Portanto, o objetivo deste artigo é investigar o potencial de cinzas do carvão mineral e escórias de aciaria, gerados na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), para aplicação como precursor de cimento álcali-ativado (CAT). No estudo experimental, a cinza volante, a cinza pesada, a escória de forno básico de oxigênio (BOF) e a escória de dessulfuração (KR) foram processadas para adequação granulométrica, e suas características químicas, físicas e mineralógicas foram investigadas. Realizou-se o ensaio de resistência à compressão em pastas ativadas com hidróxido e silicato de sódio. Os resultados indicam que a cinza volante apresenta composição química e finura adequadas para a álcali-ativação. Enquanto, a cinza pesada e as escórias precisam de adequação granulométrica, além disso, o teor de óxido de alumínio desses materiais é inferior ao observado na literatura, assim como, o teor de óxido de silício das escórias. Contudo, a resistência à compressão das pastas apresentou valores factíveis de uso como aglomerante na construção civil. O maior valor obtido foi de 23,7 MPa com uso de cinza volante, seguido de 15,8 MPa com uso de cinza pesada. Por fim, atesta-se a viabilidade do uso de subprodutos industriais da RMF como precursor de CAT.

Palavras-chaves: Aglomerantes. Geopolímeros. Escórias de aciaria. Cinzas de termelétrica.

POTENTIAL USE OF INDUSTRIAL BY-PRODUCTS FROM THE FORTALEZA METROPOLITAN REGION IN THE PRODUCTION OF ALKALI-ACTIVATED CEMENT

Abstract. Alkali-activated binder has received prominence in recent years. First, for being a possible environmentally friendly substitute for Portland cement. Second, by the potential use of local waste materials in their production. However, these wastes must correspond and can form a binder matrix when alkali-activated. Therefore, this paper aims to investigate the potential of mineral coal ash and steel slag, generated in the Metropolitan Region of Fortaleza (RMF), for application as a precursor for alkali-activated cement. In experimental study, fly ash, bottom ash, basic oxygen furnace slag (BOF), and desulfurization slag (KR) were processed for particle size adequacy, and their chemical, physical and mineralogical characteristics were investigated. A compressive strength test was performed on pastes activated with hydroxide and sodium silicate. Results indicate that the fly ash presents a chemical composition and fineness appropriate for alkali-activation. Alkali activation the bottom ash and slag need particle size adjustment, moreover, the aluminum oxide content of these materials is lower than that observed in the literature, as well as, the silicon oxide content of the slag. However, the compressive strength of the pastes presented values feasible for use as a binder in construction. The highest value obtained was 23.7 MPa with the use of fly ash, followed by 15.8 MPa with the use of bottom ash. Finally, the feasibility of using industrial by-products of RMF as a precursor for CAT is attested.

Keywords: Binders. Geopolymers. Steel slag. Thermoelectric power plant ash.

1 INTRODUÇÃO

A obtenção de cimentos álcali-ativados (CAT) ocorre pela combinação de um precursor e um ativador em condições de alto pH. Entende-se como precursor um aluminossilicato sólido na forma de pó. Por sua vez, o ativador é o material capaz de dissolver aluminossilicato e acelerar a reação química para produzir um aglomerante endurecido, que é baseado em uma combinação álcali-aluminossilicato hidratado (PROVIS, 2018).

O ativador, geralmente, é composto por um metal alcalino, como sódio e potássio, na forma de hidróxidos, silicatos, entre outros (TORRES-CARRASCO; PUERTAS, 2017). O precursor pode ser um recurso natural, como a cinza vulcânica, ou industrializado, como as argilas calcinadas. Também pode ser um subproduto industrial, como as escórias siderúrgicas e a cinza volante, assim como, pode ser um material residual oriundo de vários setores industriais (POMMER et al., 2021).

A possibilidade de aplicação de materiais locais na produção de CAT é o ponto central para o recente avanço de pesquisas relacionadas ao tema no âmbito global. As fontes de aluminossilicatos são diversas e disponíveis em todo o mundo, incluindo resíduos e subprodutos industriais. Isso os torna materiais versáteis e adaptáveis localmente (PROVIS, 2018). Todavia, existem grandes variações em suas características (NUNES; BORGES, 2021), que impõem a necessidade de estudos prévios e projetos de mistura que otimizem os resultados com o mínimo de processamento e materiais adicionais.

Na Região Metropolitana de Fortaleza-Ceará (RMF) são geradas cinzas da queima do carvão mineral na geração de energia termelétrica. Ao todo, são produzidas mais de 160.800 toneladas por ano de cinzas, das quais cerca de 13% correspondem às cinzas pesadas e 87% às cinzas volantes. Vale salientar que apenas 40% da cinza volante é aproveitada pela indústria cimenteira local e a totalidade da cinza pesada ainda não tem destinação definida (ALCÂNTARA, 2018).

Por outro lado, no processo siderúrgico são geradas escórias granuladas de alto forno e escórias de aciaria. Em 2020 foram produzidas de 2,7 milhões de toneladas de aço (IAB, 2020). Segundo a WORLDSTEEL ASSOCIATION (2020) são obtidos em torno de 400 kg de escória de aciaria para cada tonelada de aço, assim, estima-se uma produção anual de mais de 1000 toneladas de escórias de aciaria localmente.

Nos últimos anos, vários estudos foram realizados com a utilização desses subprodutos locais. Estes foram testados como agregados e material cimentício complementar na produção de argamassa e concreto de cimento Portland, assim como, em pavimentação, na ob-

tenção de zeólitas, entre outros (BRASILEIRO, 2018; DIAS, 2019; AMONI, 2019). O uso em materiais álcali-ativados é uma nova abordagem a ser desenvolvida. Além disso, vale salientar que um estudo realizado por Nobre et al. (2019) avaliou as características físico-químicas da escória de dessulfuração em Reator Kambara (KR) e da escória de forno básico de oxigênio, também conhecida pela nomenclatura na língua inglesa Basic Oxygen Furnace (BOF), identificando a presença de óxidos de cálcio, magnésio e ferro livres, os quais são causadores de expansão em compósitos de cimento Portland. Isso configura um fator limitador à utilização como agregado, principalmente, a escória KR e a escória BOF, cujas características não atenderam às especificações para esse tipo de aplicação. Portanto, é necessário investir em novos campos de aplicação para obtenção de resultados otimizados.

Nesse cenário, o emprego desses subprodutos produzidos na RMF para a produção de CAT é mais uma opção de reaproveitamento e valorização comercial dos mesmos. Além disso, é possível gerar novos produtos, com maior valor agregado e com impactos reduzidos ao meio ambiente, a partir de uma nova matriz cimentícia. Nesse sentido, o desenvolvimento de CAT com uso desses materiais locais configura um novo segmento a ser explorado. Isto é, produtos para a construção civil, chamados de Materiais Álcali-Ativado (MAA), como argamassas, concretos, grautes, entre outros, poderão ser desenvolvidos com base em uma nova matriz aglomerante. Destarte, vale ressaltar que os MAA são, atualmente, entre os materiais alternativos para o setor da construção, os que mais recebem atenção acadêmica e despertam interesse comercial em países mais desenvolvidos tecnologicamente (PROVIS; PALOMO; SHI, 2015).

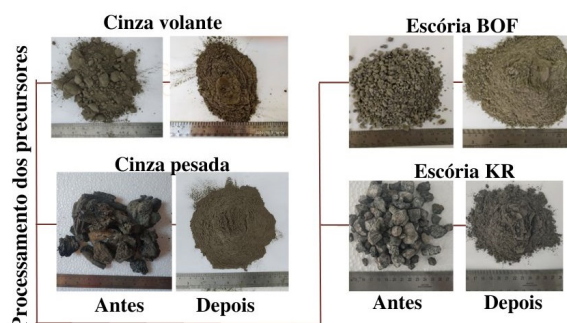
Portanto, esse artigo tem como objetivo investigar o potencial da cinza volante, da cinza pesada, da escória KR e da escória BOF, gerados na Região Metropolitana de Fortaleza, para aplicação como precursor de cimento álcali-ativado (CAT). Para isso, as características químicas, físicas e mineralógicas desses materiais foram investigadas. Adicionalmente, foram avaliadas a resistência à compressão de pastas cimentícias obtidas a partir de cinza volante, de cinza pesada e de escória de aciaria BOF, ativadas com solução de silicato de sódio (Na_2SiO_3) e de hidróxido de sódio (NaOH), com variadas concentrações molares da solução de NaOH .

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

A cinza volante e a cinza pesada são oriundas da Usina Termelétrica do Pecém. A primeira foi seca ($105^{\circ}\text{C}/24\text{h}$) e peneirada (peneira nº 100). A cinza pesada teve os grãos cominuídos em britador de mandíbulas, na sequência foram processados em moinho de bolas, durante 4 horas e passados na peneira nº 100 ($150\text{ }\mu\text{m}$). Esse procedimento também foi aplicado à escória de dessulfuração em Reator Kambara (KR), com moagem por 7 horas. A escória Basic Oxygen Furnace (BOF) teve os grãos reduzidos em aparelho de abrasão Los angeles, antes de ser moída por 7 horas. Ambas as escórias são produzidas na Companhia Siderúrgica do Pecém-CE (CSP). O beneficiamento da matéria-prima foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC/UFC). O aspecto desses materiais antes e após o processamento pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1: Tela de menu principal (a), tela de acesso aos conteúdos (b), Tela de seleção de questões (c) e tela resolução de exercício (d).



2.2 Caracterização física, química e mineralógica

A caracterização dos precursores busca a identificação de aspectos químicos e físicos importantes para o comportamento das pastas produzidas posteriormente. O teor de óxidos presente em cada precursor foi identificado por meio de Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX), no equipamento Rigaku ZSX mini II, com tubo de cobalto. A distribuição granulométrica e o tamanho das partículas foram obtidos por Difração a laser em dispersão seca, no equipamento Malvern Panalytical Mastersizer 2000. Por fim, a massa específica foi obtida conforme a ABNT NBR 16605:2017.

As informações sobre os grupos moleculares pertinentes aos componentes dos precursores foram obtidas por Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR). A análise espectral foi realizada na faixa de 4000 a 400 cm^{-1} , com uma resolu-

ção de 4 cm^{-1} em espectrômetro da Shimadzu modelo FTIR-8300.

A Difração de Raios X (DRX) foi utilizada para identificar as fases cristalinas presentes, assim como, a presença de material vítreo nos precursores. A análise da escória KR foi realizada em difratômetro PanAnalytical X-Pert, tubo de cobalto. O ângulo de varredura 2θ com intervalo angular entre 20° e 100° , passo angular (2θ) igual a $0,02^{\circ}$. Os demais precursores foram analisados no difratômetro da Rigaku DMAXB, tubo de cobre, ângulo de varredura 2θ com intervalo angular entre 5° e 100° , passo angular (2θ) igual a $0,013^{\circ}$. Finalmente, a identificação das fases foi realizada com auxílio do software *HighScore Plus 4.9 da Panalytical*, utilizando os bancos de dados CSD (*Cambridge Structural Database*) e COD (*Crystallography Open Database*).

Por fim, foram realizadas Termogravimetria e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) para verificar a estabilidade térmica das amostras. Foi utilizado o equipamento NETZSCH STA 449F3, modelo STA449F3A-1067-M. A temperatura variou de 10°C a 900°C , a uma taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, com atmosfera de nitrogênio.

2.3 Pastas álcali-ativadas

Foram produzidas pastas álcali-ativadas com a utilização da cinza volante, da cinza pesada e da escória de aciaria BOF como precursores. O ativador alcalino foi composto por hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3), cujo módulo de sílica ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) é 2,17, na proporção de 1:1. A concentração molar do hidróxido de sódio variou em 7,9 mol/L, 11,8 mol/L e 14,2 mol/L. A variação da molaridade da solução NaOH buscou evidenciar o efeito dessa variável na resistência à compressão, tendo em vista que, na literatura são empregados valores entre 6 a 16 mol/L (NADOUSHAN; RAMEZANIANPOUR, 2016; QIU et al., 2019). A relação entre solução ativadora e precursor foi mantida fixa em 0,6 para garantir trabalhabilidade à mistura. A matriz experimental pode ser visualizada na Tabela 1.

Neste estudo optou-se por utilizar os precursores sem ajustes nos teores de óxidos, seguindo uma abordagem recente que tem buscado utilizar parâmetros de proporcionamento que não incluem fatores da composição química, focando em fatores de dosagem similares aos utilizados em compósitos de cimento Portland (NAGHIZADEH; EKOLU, 2019). Vale salientar que as pastas à base de escória KR foram avaliadas com outros parâmetros de mistura e não serão apresentados os resultados nesse trabalho, visto que, os mesmos foram

Tabela 1: Matriz experimental com a nomenclatura das misturas.

Código da pasta	Precursor (g)			Solução NaOH (g)			Solução Na ₂ SiO ₃ (g)
	Cinza volante	Cinza pesada	Escória BOF	7,9 mol/L	11,8 mol/L	14,2 mol/L	
V1	387,84	387,84	387,84	116,35			116,35
V2	387,84	387,84	387,84		116,35		116,35
V3	387,84	387,84	387,84			116,35	116,35
P1	387,84	387,84	387,84	116,35			116,35
P2	387,84	387,84	387,84		116,35		116,35
P3	387,84	387,84	387,84			116,35	116,35
B1	387,84	387,84	387,84	116,35			116,35
B2	387,84	387,84	387,84		116,35		116,35
B3	387,84	387,84	387,84			116,35	116,35

publicados em trabalho anterior de Costa et al. (2021). Portanto, somente a análise da caracterização química, física e mineralógica dessa escória será apresentada no presente estudo.

A homogeneização das pastas foi realizada em argamassadeira planetária durante 03 minutos, em rotação de 140 ± 5 rpm em torno do eixo e movimento planetário de $62 \pm$ rpm. Após 1min e 30s, foi realizada uma pausa de 1min para retirada de material retido nas bordas, retomando a mistura por mais 1min e 30s. Depois disso, foram moldados 03 corpos de provas com dimensões de 40 mm x 40 mm x 40 mm, para cada pasta, utilizando moldes de acrílico, e subsequentemente, foram submetidos à cura.

As pastas de cinza volante e de cinza pesada, ambas com baixo teor de cálcio, receberam cura térmica a 60°C nas primeiras 24h, enquanto, a escória BOF recebeu cura em temperatura ambiente durante os 28 dias. A seleção da condição de cura levou em consideração a natureza do precursor, portanto, as cinzas de baixo teor de cálcio necessitam de ativação térmica para acelerar as reações químicas (geopolimerização) (NATH; KUMAR, 2013; PHOO-NGERNKHAM et al., 2018).

Por fim, foi realizado o ensaio de resistência à compressão em três exemplares na idade de 28 dias, na Máquina Universal de Ensaio EMIC DL com velocidade de aplicação de carga de 500 N/s.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização dos subprodutos

Nesta seção serão compilados os resultados da caracterização física – análise de tamanho e distribuição de partícula, assim como, a massa específica, da caracterização química - composição em óxidos e grupos funcionais, do comportamento térmico, e da composição mineralógica dos subprodutos investigados.

As informações sobre os tamanhos de partícula e a massa específica são apresentadas na Tabela 2. A cinza volante apresenta elevada finura, seu diâmetro médio está em torno de 13,16 µm, com 10% das partículas com tamanho inferior 1,61 µm e 90% inferior a 30,50 µm (Tabela 2). Como pode ser visto na Figura 2, a maior concentração de partículas está em torno de 8 µm. Essa distribuição granulométrica é adequada para produção de CAT, visto que é reconhecido que melhores propriedades cimentícias são observadas em cinzas com mais de 60% das partículas concentradas abaixo de 43 µm (KOMLJENOVIC; BASČAREVIC; BRADIC, 2010).

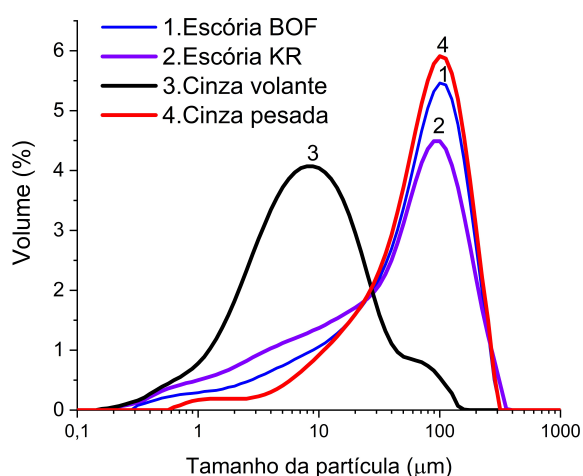
A cinza pesada e as escórias KR e BOF apresentaram tamanhos médios de partícula 6 vezes superiores em relação à dimensão média das partículas da cinza volante. Também, é possível observar na Figura 2, que a maioria de suas partículas se concentra entre 50 µm e 100 µm. Nesses precursores foram identificadas partículas entre 158 µm e 165 µm (D90%) (Tabela 2), devido a pequenos furos na malha da peneira, que permitiu a passagem de partículas ligeiramente maiores a 150 µm. Também se percebe uma pequena diferença nas dimensões D10% e D50% da escória KR em relação à escória BOF e à cinza pesada.

Vale salientar que a finura do precursor contribui para as reações químicas, como apontam Criado, Fernández-Jiménez e Palomo (2005). Segundo esses autores, o contato entre as partículas sólidas de aluminossilicatos e a solução alcalina induz a dissolução dos componentes vítreos do precursor, liberando aluminatos e silicatos, que interagem e formam novas ligações. Portanto, quanto maior a finura das partículas, maior a área de contato com a solução alcalina e mais eficiente é o processo de dissolução. Nesse sentido, um processo de moagem adequado dos precursores otimiza os resultados dos materiais resultantes (SATHONSA-OWAPHAK; CHINDAPRASIRT; PIMRAKSA, 2009).

Tabela 2: Características físicas dos subprodutos utilizados como precursores.

Característica	Tamanho da partícula	Cinza volante	Cinza pesada	Escória KR	Escória BOF
Distribuição granulométrica	D10%	1,61 µm	12,49 µm	2,76 µm	5,78 µm
	D50%	7,38 µm	70,39 µm	49,06 µm	63,38µm
	D90%	30,50 µm	164,20 µm	159,91 µm	158,99 µm
	Dmédio	13,16 µm	82,36 µm	70,58 µm	76,05 µm
Massa Específica (NBR 16605:17)		2,18 g/cm³	1,52 g/cm³	3,19 g/cm³	2,92 g/cm³

Figura 2: Distribuição granulométrica dos subprodutos (precursores).



Tanto para a cinza pesada, quanto para as escórias de aciaria, há relatos de melhoramento nas propriedades mecânicas dos produtos finais com grãos de menores dimensões (DHOBLE; AHMED, 2018).

Aliada à finura, a composição química exerce um papel fundamental na utilização desses precursores. Na Tabela 3 estão apresentadas as composições químicas em óxidos.

Tabela 3: Composição em % de massa dos principais óxidos dos subprodutos (precursores).

Componentes	Cinza volante (%)	Cinza pesada (%)	Escória KR (%)	Escória BOF (%)
SiO ₂	41,49	50,66	8,5	12,5
Al ₂ O ₃	14,49	10,66	1,7	2,5
CaO	9,54	5,61	54,0	63,0
Fe ₂ O ₃	24,95	26,99	25,7	16,5
K ₂ O	4,54	3,68	0,1	0,4
MnO	0,17	0,14	3,3	2,0
Outros	4,82	2,26	6,7	3,1

A cinza volante apresenta teor de óxido de ferro

somado aos óxidos de silício e de alumínio (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) igual a 80,93% (Tabela 3). Destarte, quando esse somatório é superior a 70% e o teor de cálcio abaixo de 18%, a cinza volante é classificada como classe F, conforme ASTM C618:2019. As cinzas de classe F são ricas em alumina (Al₂O₃) e sílica (SiO₂), que são as fases reativas importantes para seu uso como material cimentício. Nessas cinzas, o conteúdo de SiO₂ pode variar entre 40% e 65% e de Al₂O₃ entre 17% a 30% (KOMLJENOVIC; BAŠČAREVIĆ; BRADIĆ, 2010; CHINDAPRASIRT et al., 2012).

É comum na literatura o uso da relação SiO₂/Al₂O₃ do precursor como parâmetro de proporcionamento de cimentos alcalinos, visto sua influência nas propriedades do material resultante (SANTA et al., 2013; CHINDAPRASIRT et al., 2012; GARCIA-LODEIRO et al., 2014; LONGHI et al., 2016). Todavia, a variabilidade na composição química e a falta de uniformidade na forma como esta razão é medida - por massa, por razão molar, por razão atômica ou por percentual de massa de óxidos - dificulta a compreensão da relação entre esses dois óxidos (GARCIA-LODEIRO et al., 2014).

Conforme a Tabela 3, a razão SiO₂/Al₂O₃ da cinza volante é 2,86 (% de massa de óxidos), esse valor está próximo aos valores apresentados pelas cinzas volantes empregadas em projetos de mistura de compósitos álcali-ativados, entre 2,20 e 2,30 (PAVITHRA et al., 2016; PHOO-NGERNKHAM et al., 2018). Em relação a razão molar SiO₂/Al₂O₃, valores entre 1 e 5 são considerados adequados para a aplicações na construção civil, uma vez que, valores abaixo de 1 e superiores a 5, geralmente apresentam baixo desenvolvimento da resistência mecânica, baixa estabilidade térmica, baixa resistência química e tendência a se dissolver na água (PROVIS; DAVENTER, 2014). Para os autores Chindaprasirt et al. (2012) e Garcia-Lodeiro et al. (2014), essas relações, para as cinzas volantes, apresentam as melhores propriedades mecânicas com valores entre 3 e 4.

Em materiais residuais, em que a parcela de SiO₂ reativo é inferior, comparados ao metacaulim, à cinza volante e à escória de alto forno, a relação molar

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ pode chegar até 7 (LIU et al., 2019). Entretanto, é mais comum a variação de 1 a 4,5 (KOMNITAS; ZAHARAKI, 2007; SATHONSAOWAPHAK; CHINDAPRASIRT; PIMRAKSA, 2009).

Para a cinza pesada não há classificação específica. Ademais, pode-se observar na Tabela 3, que essa cinza também possui grande percentual de SiO_2 , apresentando a razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ igual a 4,75 (em % de massa de óxidos). Entretanto, as cinzas pesadas utilizadas nos trabalhos de Santa et al. (2013) e de Xie e Ozbakkaloglu (2015) apresentam um valor em torno de 2,3. Isso evidencia a menor presença de Al_2O_3 e a maior quantidade de SiO_2 nas cinzas pesadas locais.

Nas escórias, o conteúdo de SiO_2 e Al_2O_3 é muito inferior aos das cinzas, geralmente, o primeiro varia entre 7,8% a 15,2%, e o segundo, entre 1,2% a 3,4% (DHOBLE; AHMED, 2018). Assim, os valores encontrados nas escórias KR e BOF estão dentro desses intervalos. Contudo, os altos teores de CaO , como vistos na Tabela 3, são tipicamente encontrados nas escórias, variando entre 40% e 70% (JIANG et al., 2018; WANG, 2016). Portanto, os valores de 54,0% e 63,0% para a escória KR e a escória BOF, respectivamente, estão na faixa encontrada na literatura. Em geral, as relações entre óxidos mais recomendadas para ativação alcalina de escórias são: a relação CaO/SiO_2 variando entre 0,50 e 2,5 e a relação $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ entre 0,1 e 0,6 (PROVIS; DAVENTER, 2014; SUN; CHEN, 2019). Contudo, a correlação obtida a partir da Tabela 3 de CaO/SiO_2 igual a 6,35 e 5,04 para as escórias BOF e KR, respectivamente, evidenciam o baixo conteúdo de SiO_2 presentes nas escórias, visto que predomina o óxido de cálcio.

A presença de cálcio em cimentos alcalinos altera significativamente a cinética da reação química e os produtos de reação correspondentes. Conforme Xie et al. (2020), quando o teor de CaO presentes nas misturas está abaixo de 8%, a resistência mecânica é principalmente atribuída aos produtos formados por SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Contudo, para o conteúdo de CaO acima de 8%, o efeito dos hidratos das reações do CaO é mais pronunciado, isto é, passa a ter influência na cinética de reação.

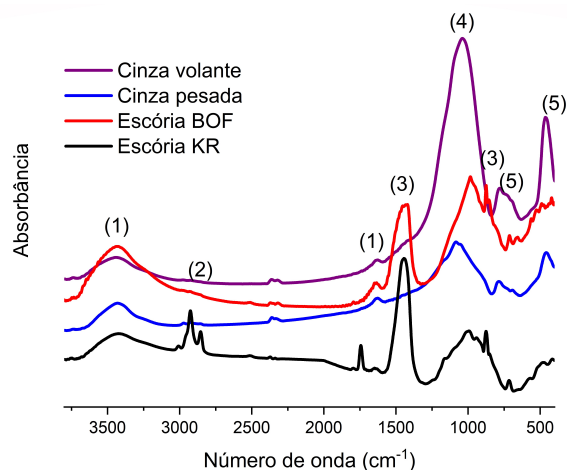
Todos os precursores apresentam teores de Fe_2O_3 elevados, o que é comum nas escórias (JIANG et al., 2018). Enquanto, nas cinzas do carvão mineral, o teor de Fe_2O_3 é muito variável e depende da origem do carvão mineral. Na usina local, o carvão é proveniente da Colômbia, cujas reservas são de carvão antracito e betuminoso, portanto, o teor de Fe_2O_3 pode variar entre 10% e 40% (BELVISO, 2018; CIRINO et al., 2022). É importante considerar a presença de óxidos de ferro em CAT, visto que durante o processo de ativação alca-

lina, o Fe dissolvido reprecipita mais rapidamente que Si e Al, formando fases de hidróxido ou oxi-hidróxidos (DEVENTER et al., 2007). Além disso, pode ocorrer a substituição de Al^{3+} por Fe^{3+} em sítios octaédricos na estrutura do gel de aluminossilicato, podendo até melhorar as propriedades de ligantes de baixo teor de cálcio (GOMES et al., 2011). No entanto, foi reportado na literatura que a presença de Fe_2O_3 pode inibir a formação de hidratos dentro de estruturas ricas em cálcio (CHOI; LEE, 2012). Portanto, ainda existem muitas lacunas a respeito do efeito do ferro nas reações de álcali-ativação, e como visto, não há consenso sobre o tema.

Na sequência, a presença de grupos moleculares de fases mineralógicas importantes para os precursores é indicada nos espectros de absorção de infravermelho da Figura 3. As bandas principais (4) da cinza volante e da cinza pesada estão posicionadas em $1039,6\text{ cm}^{-1}$ e $1083,9\text{ cm}^{-1}$, respectivamente. Essas bandas estão associadas às ligações Si-O-T (T= Si ou Al), que geralmente ocorrem entre 900 cm^{-1} e 1100 cm^{-1} , nessas matérias-primas que contêm silício e alumínio presentes (ABDALQADER; JIN; AL-TABBAA, 2016). Essas bandas estão posicionadas em $983,6\text{ cm}^{-1}$ na escória de aciaria BOF e em $993,3\text{ cm}^{-1}$ na escória KR. Nessa última escória, os silicatos de cálcio, também, são visualizados em uma região secundária (2), entre 2930 e 2920 cm^{-1} e entre 2855 e 2850 cm^{-1} (VARAS; BUERGO; FORT, 2005).

O deslocamento dessa banda na cinza pesada para maiores números de onda indica maior grau de reticulação desse precursor, isto é, a presença de sílica cristalina (ISMAIL et al., 2014).

Figura 3: Espectroscopia de Infravermelho dos precursores.



Legenda: (1) - água; (2) silicatos; (3) carbonatos; (4) aluminossilicatos; (5) sílica

Analogamente, as bandas posicionadas entre 420,4

cm^{-1} e $489,9 \text{ cm}^{-1}$, assim como, as bandas entre $655,7 \text{ cm}^{-1}$ e $781,1 \text{ cm}^{-1}$, em todos os precursores, são atribuídas à presença de sílica vítrea e cristalina (5) (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2005). As bandas em $1625,9 \text{ cm}^{-1}$ e $1633,1 \text{ cm}^{-1}$, $3441,0 \text{ cm}^{-1}$, $3431,3 \text{ cm}^{-1}$, $3423,6 \text{ cm}^{-1}$ e $1743,6 \text{ cm}^{-1}$ representam a presença de água estrutural e molecular nas amostras (1) (ISMAIL et al., 2014).

Nas escórias de aciaria BOF e KR, uma banda intensa em $1433,1 \text{ cm}^{-1}$ e $1447,3 \text{ cm}^{-1}$ e outra banda menos intensa e mais aguda em $873,7 \text{ cm}^{-1}$ e em $875,6 \text{ cm}^{-1}$, respectivamente, estão relacionadas à ligação C-O contido nos carbonatos (CaCO_3) (3) (ČEŠNOVAR et al., 2019). Na sequência, as análises térmicas da cinza volante e da cinza pesada são apresentadas nas Figuras 4a e 4b, respectivamente.

Conforme as Figuras 4a e 4b, as cinzas, volante e pesada, demonstram grande estabilidade térmica uma vez que não é registrado perda de massa na análise termogravimétrica. Os picos em $295,0 \text{ °C}$ e em $309,4 \text{ °C}$ visualizados nas curvas de DSC nas Figuras 4a e 4b, respectivamente, podem estar relacionados à transição dos óxidos de ferro da fase amorfa FeO (Goethita) na fase cristalina $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (Hematita). A reação de transformação dos compostos de Fe, geralmente, ocorre em torno de 300 °C , no entanto, ela pode ser movida para temperaturas mais altas devido à presença de sílica e alumínio (NERGIS et al., 2020). Nas Figuras 5a e 5b são apresentadas as análises térmicas das escórias BOF e KR, respectivamente.

A perda de massa observada na escória BOF e na escória KR é igual a 6,6% e 3,6%, respectivamente (Figuras 5a e 5b). Um pico é registrado na curva de DSC em $689,2 \text{ °C}$ na escória BOF e em $679,7 \text{ °C}$ na escória KR. Em temperaturas próximas a 700 °C a perda de massa e os picos da DSC são atribuídos à decomposição de carbonatos (NG et al., 2018). Na sequência, as principais fases cristalinas da cinza volante e da cinza pesada são visualizadas nos difratogramas das Figuras 6a e 6b, respectivamente.

A presença de sílica cristalina é observada em ambas as amostras, assim como, fases contendo alumínio e ferro. Quartzo, mulita, magnetita são fases minerais comumente encontradas nas cinzas do carvão mineral (CRIADO et al., 2007; HAQ; PADMANABHAN; LICCIULLI, 2014). Além disso, a presença de uma protuberância ou halo posicionado entre 15° e 35° em 2θ é observado em ambas as cinzas, indicando a presença de fases vítreas (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2003). Entretanto, na cinza volante, o halo amorfo é mais pronunciado, visto que o conteúdo de material amorfo geralmente é maior que o conteúdo presente nas

cinzas pesadas (PROVIS; PALOMO; SHI, 2015). As principais fases cristalinas das escórias BOF e KR podem ser visualizadas nas Figuras 7a e 7b, respectivamente.

A maioria das fases identificadas na escória BOF contém cálcio em sua composição (Figura 8a). Além do óxido de cálcio e do carbonato de cálcio, estão presentes gehlenita, faialita, silicato de cálcio, ferrita de cálcio e hematita, que são consideradas comuns em escórias BOF (DING et al., 2017).

Por fim, as principais fases cristalinas identificadas na escória KR foram a ferrita de aluminato de cálcio (AlCaFeO^{+6}), o óxido ferroso de magnésio (Fe_2MgO_4) e o silicato de cálcio ($\text{Ca}(\text{SiO}_5)$), conforme a Figura 7b. Vale salientar que em matrizes cimentícias, a presença de alguns minerais cristalinos, que não sofrem reação química, pode trazer benefícios. As partículas de quartzo, por exemplo, podem criar barreiras para propagação de trincas, assim como, o óxido de alumínio cristalino eleva a dureza do material e a mulita pode aumentar a refratividade das misturas (NERGIS et al., 2020).

3.2 Resistência à compressão das pastas álcali-ativadas

Os resultados de resistência à compressão das pastas produzidas conforme a Tabela 1 estão apresentados na Figura 8a. Também, podem ser visualizados o aspecto das pastas no estado fresco (Figura 8b) e os corpos de prova produzidos no estado endurecido (8c), com o objetivo de ilustrar a transformação do material. Isso mostra a capacidade de endurecimento das pastas para formação de um material rígido com capacidade resistente.

A resistência à compressão das pastas à base de cinza volante variou de 11,7 à 23,7 MPa (Figura 8a). Nota-se que a maior resistência à compressão é observada na pasta com concentração molar do NaOH igual a 11,8 mol/L. Este resultado está de acordo com literatura, que considera ideal a faixa de 10 mol/L a 12 mol/L, para as cinzas volantes (CHINDAPRASIRT et al., 2009; XIE et al., 2020).

Por outro lado, para as cinzas pesadas, a resistência diminuiu quando a molaridade da solução aumentou. Portanto, o melhor resultado obtido foi igual a 15,8 MPa com 7,9 mol/L. Esse resultado não era esperado, visto que a cinza pesada é um material obtido da mesma origem da cinza volante, e não apresenta alto teor de cálcio.

As pastas produzidas com uso de escória BOF também apresentaram maiores resistências à medida que a concentração molar do NaOH diminuiu, isto é, 10 MPa com uso de solução com 7,9 mol/L. Este resul-

Figura 4: Análises térmicas TGA/DSC: a) cinza volante; b) cinza pesada.

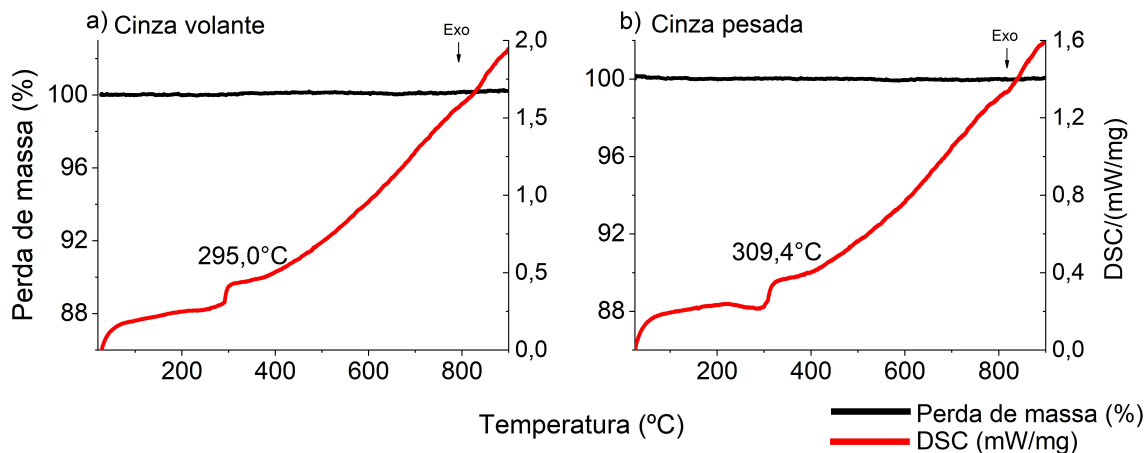


Figura 5: Análises térmicas TGA/DSC: a) escória BOF; b) escória KR.

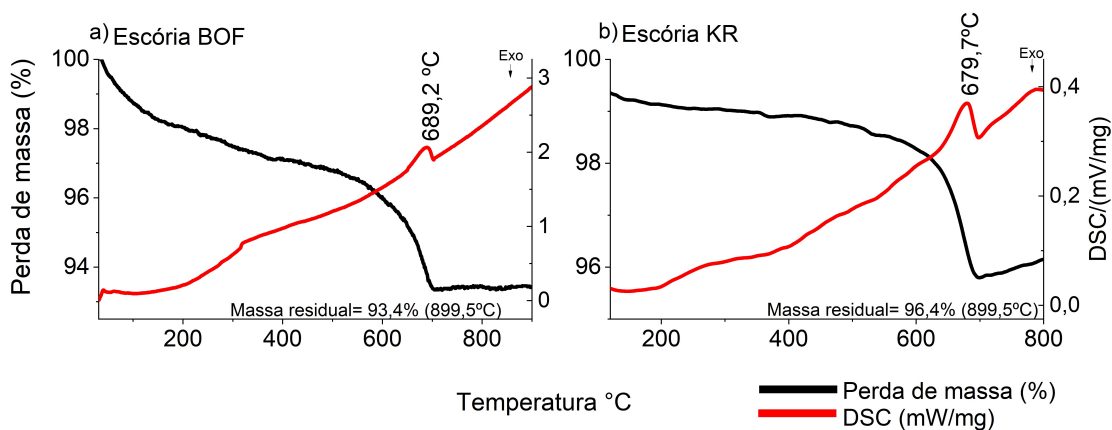


Figura 6: Difratomogramas de raios X: a) cinza volante; b) cinza pesada.

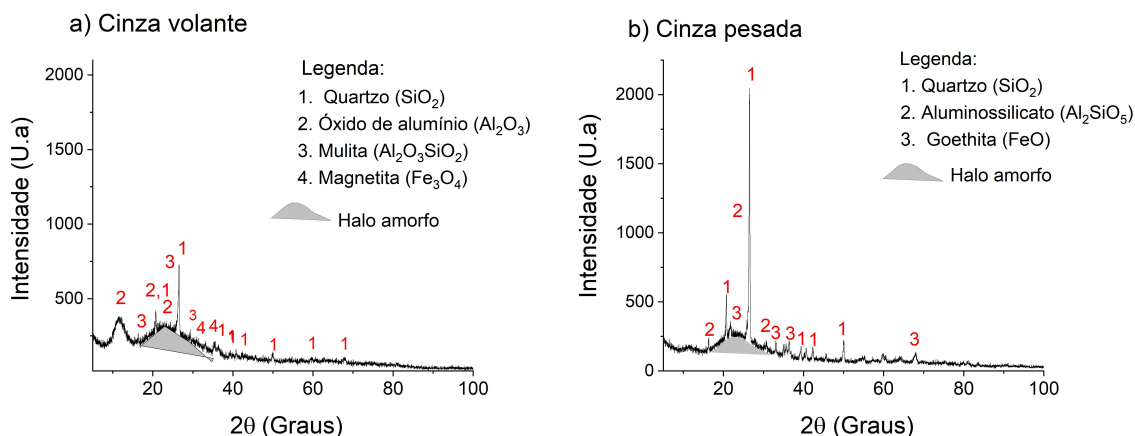


Figura 7: Difratomogramas de raios X: a) escória BOF; b) escória KR.

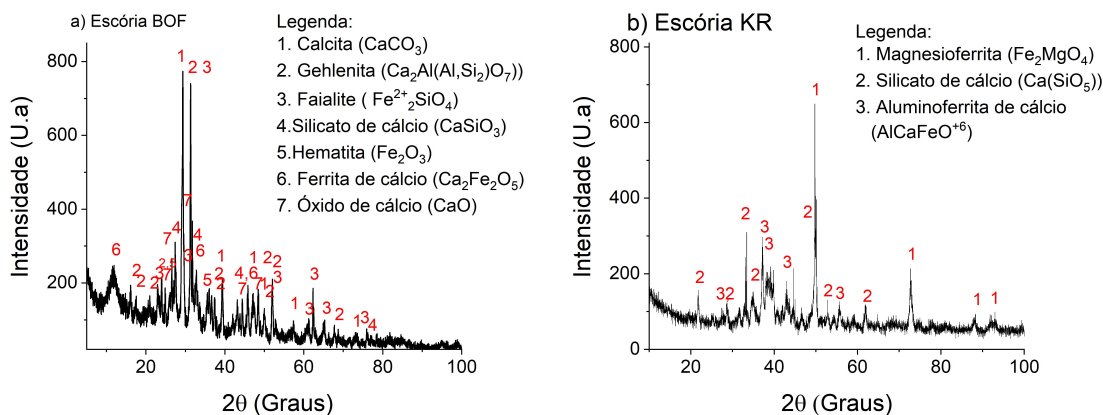
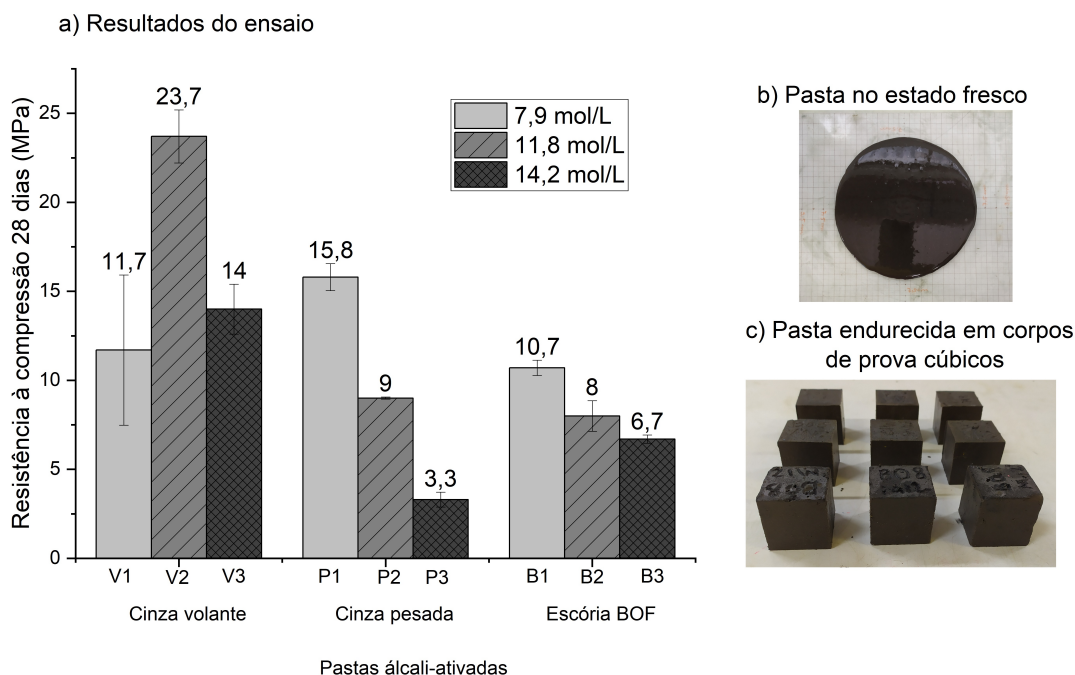


Figura 8: Resultados de resistência à compressão das pastas.



tado condiz com a literatura, visto que para precursores com alto teor de cálcio, a concentração entre 6 e 8 mol/L é apontada como ideal (NADOUSHAN; RAMEZANIANPOUR, 2016). Vale salientar que a pasta com escória BOF foi curada em temperatura ambiente, enquanto, as cinzas precisaram de cura térmica para ocorrer a álcali-ativação.

Por fim, vale salientar que o efeito da concentração de álcalis pode variar de acordo com o tipo de precursor. Desse modo, o efeito positivo na resistência à compres-

são, geralmente, é observado até certa faixa. Isto porque um aumento adicional na concentração de sódio reduz a estabilidade das espécies de silicato oligomérico e o equilíbrio das espécies muda para a formação das espécies de silicato mononuclear e gera excesso de OH^- (XIE et al., 2020). Esses íons de hidróxido em excesso, por sua vez, reduzem a eficácia do processo de policondensação e, subsequentemente, diminuem a resistência à compressão (KHALE; CHAUDHARY, 2007).

4 CONCLUSÃO

As principais considerações a respeito da caracterização da cinza volante, da cinza pesada, da escória de dessulfuração KR e da escória de aciaria BOF são apresentadas a seguir:

- As características físicas, químicas e mineralógicas da cinza volante indicam que esse material tem potencial uso para produção de cimentos álcali-ativados como precursor principal, sem necessidade de ajustes na composição. Isto está relacionado à sua composição em óxidos de silício e alumínio ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2,86\%$), a finura elevada das partículas e presença de material vítreo.
- Na cinza pesada também foi evidenciada a presença de material vítreo. No entanto, o percentual de óxido de alumínio é inferior ao da cinza volante, influenciando na relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, cujo valor é igual a 4,75, superior ao estimado na literatura.
- As escórias KR e BOF apresentaram elevado teor de óxido de cálcio correspondente a 54,0% e 63,0%, respectivamente. Contudo, baixos teores de óxidos de silício e de alumínio.
- Nas pastas produzidas com a cinza volante, a cinza pesada e a escória BOF obtiveram-se valores de resistência à compressão variando de 3,3 MPa a 23,7 MPa em função da concentração molar do NaOH. Para a cinza volante, os melhores resultados foram vistos para a concentração molar de 11,8 mol/L (23,7 MPa), para a cinza pesada, a concentração de 7,9 mol/L promoveu a maior resistência de 15,8 MPa. E por fim, para a escória BOF, o melhor também ocorreu com 7,9 mol/L (10,7 MPa). Portanto, pode verificar que a concentração ideal de álcalis varia de acordo com o tipo de precursor.
- Por fim, os resultados da caracterização e das resistências à compressão das pastas obtidas indicam que a cinza volante, a cinza pesada e a escória BOF tem potencial uso como precursor de cimento álcali-ativado. Contudo, a cinza pesada e a escória BOF podem ser otimizadas em composição com outros materiais precursores para ajustes nas relações de óxidos.

De modo geral, os materiais estudados apresentam potencial de reaproveitamento na produção de cimentos álcali-ativados, visto que foi possível obter pastas com resistências à compressão adequadas ao uso em materiais compósitos de diferentes aplicações, como argamassas e concretos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio aos projetos 409236/2022-5.

REFERÊNCIAS

- ABDALQADER, A. F.; JIN, F.; AL-TABBAA, A. Development of greener alkali-activated cement: utilisation of sodium carbonate for activating slag and fly ash mixtures. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 113, n. 1, p. 66–75, 2016.
- ALCÂNTARA, M. R. G. **Estudo da utilização de cinzas pesadas de termoeletricas para produção de blocos de concreto para pavimentos intertravados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- AMONI, B. C. **Desenvolvimento de um método de síntese de zeólita tipo A utilizando cinzas volantes de carvão: avaliação do uso como aditivo de mistura asfáltica morna**. Tese (Doutorado em química) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- BELVISO, C. State-of-the-art applications of fly ash from coal and biomass: A focus on zeolite synthesis processes and issues. **Progress in Energy and Combustion Science**, Elsevier, v. 65, n. 1, p. 109–135, 2018.
- BRASILEIRO, F. L. C. **Utilização de cinzas de termoeletricas na confecção de blocos de concreto para alvenaria**. Dissertação (Mestrado em construção civil) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- ČEŠNOVAR, M.; TRAVEN, K.; HORVAT, B.; DUCMAN, V. The potential of ladle slag and electric arc furnace slag use in synthesizing alkali activated materials; the influence of curing on mechanical properties. **Materials**, MDPI, v. 12, n. 7, p. 1173, 2019.
- CHINDAPRASIRT, P.; JATURAPITAKKUL, C.; CHALEE, W.; RATTANASAK, U. Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. **Waste management**, Elsevier, v. 29, n. 2, p. 539–543, 2009.
- CHINDAPRASIRT, P.; SILVA, P. D.; SAGOE-CRENTSIL, K.; HANJITSUWAN, S. Effect of SiO_2 and Al_2O_3 on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. **Journal of Materials Science**, Springer, v. 47, n. 12, p. 4876–4883, 2012.

- CHOI, S. C.; LEE, W. K. Effect of Fe_2O_3 on the physical property of geopolymer paste. **Advanced materials research**, Trans Tech Publ, v. 586, n. 1, p. 126–129, 2012.
- CIRINO, M. A. G.; CABRAL, A. E. B.; SILVA, D. A. A.; SAMPAIO, K. N. H. Caracterização e avaliação da atividade pozolânica das cinzas provenientes da queima de carvão mineral das termelétricas do pecém, ceará, brasil. **Matéria (Rio de Janeiro)**, SciELO Brasil, v. 26, n. 4, p. e13090, 2022.
- COSTA, H. N. d.; NOBERTO, C. C.; ALMEIDA, L. A.; NOGUEIRA, R. E. F. Q.; CABRAL, A. E. B. Alkaline activation of cement pastes with desulfurization slag. **Cerâmica**, SciELO Brasil, v. 67, n. 1, p. 399–405, 2021.
- CRIADO, M.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; TORRE, A. D. L.; ARANDA, M.; PALOMO, A. An xrd study of the effect of the SiO_2/Na_2O ratio on the alkali activation of fly ash. **Cement and concrete research**, Elsevier, v. 37, n. 5, p. 671–679, 2007.
- DEVENTER, J. V.; PROVIS, J.; DUXSON, P.; LUKEY, G. Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. **Journal of hazardous materials**, Elsevier, v. 139, n. 3, p. 506–513, 2007.
- DHOBLE, Y. N.; AHMED, S. Review on the innovative uses of steel slag for waste minimization. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, Springer, v. 20, n. 3, p. 1373–1382, 2018.
- DIAS, A. R. O. **Avaliação técnica do aproveitamento da escória de aciaria Baosteel slag short flow como agregado miúdo na produção de concreto**. Dissertação (Mestrado em construção civil) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- DING, Y.-C.; CHENG, T.-W.; LIU, P.-C.; LEE, W.-H. Study on the treatment of bof slag to replace fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 146, n. 1, p. 644–651, 2017.
- FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Characterisation of fly ashes. potential reactivity as alkaline cements. **Fuel**, Elsevier, v. 82, n. 18, p. 2259–2265, 2003.
- FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure. **Microporous and mesoporous materials**, Elsevier, v. 86, n. 1-3, p. 207–214, 2005.
- GARCIA-LODEIRO, I.; FERNÁNDEZ-JIMENEZ, A.; PENA, P.; PALOMO, A. Alkaline activation of synthetic aluminosilicate glass. **Ceramics International**, Elsevier, v. 40, n. 4, p. 5547–5558, 2014.
- GOMES, K. C.; TORRES, S. M.; BARROS, S. D.; VASCONCELOS, I. F.; BARBOSA, N. P. Mechanical properties of geopolymers with iron rich precursors. In: ANAIS... **Conference Paper**, July. Madri: XIII International Congress on the Chemistry of Cement, 2011. p. 1.
- HAQ, E. ul; PADMANABHAN, S. K.; LICCIULLI, A. Synthesis and characteristics of fly ash and bottom ash based geopolymers—a comparative study. **Ceramics International**, Elsevier, v. 40, n. 2, p. 2965–2971, 2014.
- IAB. **Anuário estatístico de 2020**. IAB. 2020. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/06/Mini_anuario_2021_AcoBrasil-1.pdf>. Acesso em: 04 Jan. 2022.
- ISMAIL, I.; BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; NICOLAS, R. S.; HAMDAN, S.; DEVENTER, J. S. van. Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 45, n. 1, p. 125–135, 2014.
- JIANG, Y.; LING, T.-C.; SHI, C.; PAN, S.-Y. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—a review. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 136, n. 1, p. 187–197, 2018.
- KHALE, D.; CHAUDHARY, R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Journal of materials science**, Springer, v. 42, n. 3, p. 729–746, 2007.
- KOMLJENOVIC, M.; BAŠČAREVIC, Z.; BRADIC, V. Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. **Journal of Hazardous Materials**, Elsevier, v. 181, n. 1-3, p. 35–42, 2010.
- KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D. Geopolymers: A review and prospects for the minerals industry. **Minerals engineering**, Elsevier, v. 20, n. 14, p. 1261–1277, 2007.
- LIU, Y.; SHI, C.; ZHANG, Z.; LI, N. An overview on the reuse of waste glasses in alkali-activated materials.

- Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 144, n. 1, p. 297–309, 2019.
- LONGHI, M. A.; RODRÍGUEZ, E. D.; BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; KIRCHHEIM, A. P. Valorisation of a kaolin mining waste for the production of geopolymers. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 115, n. 1, p. 265–272, 2016.
- NADOUSHAN, M. J.; RAMEZANIANPOUR, A. A. The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 111, n. 1, p. 337–347, 2016.
- NAGHIZADEH, A.; EKOLU, S. Method for comprehensive mix design of fly ash geopolymer mortars. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 202, n. 1, p. 704–717, 2019.
- NATH, S.; KUMAR, S. Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymer. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 38, n. 1, p. 924–930, 2013.
- NERGIS, D. D. B.; ABDULLAH, M. M. A. B.; SANDU, A. V.; VIZUREANU, P. Xrd and tg-dta study of new alkali activated materials based on fly ash with sand and glass powder. **Materials**, MDPI, v. 13, n. 2, p. 343, 2020.
- NG, C.; ALENGARAM, U. J.; WONG, L. S.; MO, K. H.; JUMAAT, M. Z.; RAMESH, S. A review on microstructural study and compressive strength of geopolymer mortar, paste and concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 186, n. 1, p. 550–576, 2018.
- NOBRE, C. P.; SILVA, A. M. T.; LIMA, M. P. N.; CABRAL, A. E. B. Caracterização físico-química de escórias de aciaria para uso como agregados em compósitos cimentícios. In: ANAIS... **Congresso Brasileiro do concreto**. Fortaleza: IBRACON, 2019. v. 61, p. 1–16.
- PAVITHRA, P.; REDDY, M. S.; DINAKAR, P.; RAO, B. H.; SATPATHY, B.; MOHANTY, A. A mix design procedure for geopolymer concrete with fly ash. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 133, n. 1, p. 117–125, 2016.
- PHOO-NGERNKHAM, T.; PHIANGPHIMAI, C.; DAMRONGWIRIYANUPAP, N.; HANJITSUWAN, S.; THUMRONGVUT, J.; CHINDAPRASIRT, P. A mix design procedure for alkali-activated high-calcium fly ash concrete cured at ambient temperature. **Advances in Materials Science and Engineering**, Hindawi, v. 2018, n. 1, p. 1, 2018.
- PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. **Cement and concrete research**, Elsevier, v. 114, n. 1, p. 40–48, 2018.
- PROVIS, J. L.; DAVENTER, J. S. J. V. **Alkali-Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM**. Springer. 2014.
- PROVIS, J. L.; PALOMO, A.; SHI, C. Advances in understanding alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 78, n. 1, p. 110–125, 2015.
- QIU, J.; ZHAO, Y.; XING, J.; SUN, X. et al. Fly ash/blast furnace slag-based geopolymer as a potential binder for mine backfilling: effect of binder type and activator concentration. **Advances in Materials Science and Engineering**, Hindawi, v. 2019, n. 1, p. 1, 2019.
- SANTA, R. A. A. B.; BERNARDIN, A. M.; RIELLA, H. G.; KUHNEN, N. C. Geopolymer synthesized from bottom coal ash and calcined paper sludge. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 57, n. 1, p. 302–307, 2013.
- SATHONSAOWAPHAK, A.; CHINDAPRASIRT, P.; PIMRAKSA, K. Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. **Journal of hazardous materials**, Elsevier, v. 168, n. 1, p. 44–50, 2009.
- 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**, Springer, v. 138, n. 1, p. 47–56, 2019.
- TORRES-CARRASCO, M.; PUERTAS, F. Waste glass as a precursor in alkaline activation: Chemical process and hydration products. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 139, n. 1, p. 342–354, 2017.
- VARAS, M.; BUERGO, M. A. D.; FORT, R. Natural cement as the precursor of portland cement: Methodology for its identification. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 35, n. 11, p. 2055–2065, 2005.
- WANG, C.-C. Modelling of the compressive strength development of cement mortar with furnace slag and desulfurization slag from the early strength. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 128, n. 1, p. 108–117, 2016.

WORLDSTEEL ASSOCIATION. **Steel industry co-products**. 2020. Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:3d1e2c1e-e306-4bac-a364-3672af7e30b9/Co%2520Products%25202020.pdf>> Acesso em: 05 Jan. 2022.

XIE, T.; OZBAKKALOGLU, T. Behavior of low-calcium fly and bottom ash-based geopolymer concrete cured at ambient temperature. **Ceramics International**, Elsevier, v. 41, n. 4, p. 5945–5958, 2015.

XIE, T.; VISINTIN, P.; ZHAO, X.; GRAVINA, R. Mix design and mechanical properties of geopolymer and alkali activated concrete: Review of the state-of-the-art and the development of a new unified approach. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 256, n. 1, p. 119380, 2020.