



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MICHAEL DOUGLAS BARROS DE ALENCAR

**INFLUÊNCIA DO USO DE CIMENTO PORTLAND COMO MATERIAL
SUPLEMENTAR EM PASTAS DE CINZA VOLANTE ÁLCALI-ATIVADAS**

CRATEÚS
2024

MICHAEL DOUGLAS BARROS DE ALENCAR

INFLUÊNCIA DO USO DE CIMENTO PORTLAND COMO MATERIAL
SUPLEMENTAR EM PASTAS DE CINZA VOLANTE ÁLCALI-ATIVADAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, como requisito parcial para obtenção do grau de bacharelado em Engenharia Civil.

Orientadora: Dra. Heloína Nogueira da Costa

CRATEÚS

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A354i Alencar, Michael Douglas Barros de.

Influência do uso de Cimento Portland como material suplementar em pastas de cinza volante álcali-ativadas. / Michael Douglas Barros de Alencar. – 2024.

38 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2024.

Orientação: Profa. Dra. Heloína Nogueira da Costa.

1. Cimento Portland. 2. Materiais de construção. 3. Materiais álcali ativados. 4. Mistura. 5. Ativadores. I. Título.

CDD 620

MICHAEL DOUGLAS BARROS DE ALENCAR

INFLUÊNCIA DO USO DE CIMENTO PORTLAND COMO MATERIAL
SUPLEMENTAR EM PASTAS DE CINZA VOLANTE ÁLCALI-ATIVADAS

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Ceará,
Campus de Crateús, como requisito parcial
para obtenção do grau de bacharelado em
Engenharia Civil.

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Heloína Nogueira da Costa (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Civil Me. Clédson Lucena de Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Jorge Luis Santos Ferreira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

À Deus, que sempre me deu força de vontade, saúde, me guardou, protegeu, por nenhum segundo me abandonou e, me permitiu realizar mais um sonho.

Agradeço a minha mãe, Erivanda, por todo apoio, motivação, amor e nunca ter me deixado faltar nada, por ter acreditado em mim, me ajudando a superar todos os obstáculos e vivendo comigo a realização desse sonho.

Agradeço as minhas tias, Erlândia e Evaneide que sempre me apoiaram e me ajudaram em toda essa jornada.

Agradeço aos meus avós fraternos, Maria Anita e Sebastião, pelo carinho e amor recebido, pelo apoio que sempre me deram.

Agradeço a minha namorada, Juliana, por todo apoio, suporte e motivação que sempre me deu.

Agradeço a minha orientadora Prof. Dra. Heloína Nogueira da Costa, por me aceitar como orientando e me guiar tão bem nessa trajetória.

Também agradeço aos amigos que fiz durante a graduação, em especial, o Eric, Iuri, Vildemar, Erinaldo, Helber, Vanutti, Luan e Natanael por dividirmos as alegrias, tristezas e lutas nessa etapa das nossas vidas.

E por fim, aos professores participantes da banca examinadora pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

RESUMO

O cimento é o aglomerante mais utilizado na construção civil. No entanto, uma grande carga de poluentes gasosos é eliminada na atmosfera durante o seu processo de fabricação. Por outro lado, os materiais álcali-ativados têm apresentado uma proposta de uso mais eficiente dos recursos ambientais, reduzindo o consumo de cimento. No entanto, algumas propriedades obtidas de matrizes álcali-ativadas ainda não se ajustam adequadamente aos padrões de usabilidade na construção civil. Portanto, o objetivo principal dessa pesquisa é avaliar o efeito da adição de cimento Portland em pastas de cinza volante álcali-ativada através de ensaios do material no estado fresco e endurecido. Para isso, foram confeccionadas pastas contendo cimento Portland (CP) nas proporções de 5 e 10%, ativadas com uma solução de silicato e hidróxido de sódio combinados e uma solução somente de hidróxido de sódio. No estado fresco avaliou-se a massa específica aparente, o diâmetro de espalhamento através do teste de mini slump, a tensão de escoamento, tempo de fluidez e o tempo de início de pega. Foi avaliado o comportamento mecânico da pasta através do ensaio de resistência à compressão. Uma análise da microestrutura foi realizada através de uma microscopia eletrônica de varredura (MEV). A presença de silicato de sódio na solução aumentou a massa específica aparente, diminuiu a tensão de escoamento na pasta com adição de 10% de cimento e aumentou o diâmetro de espalhamento em 30% em relação a pasta contendo apenas hidróxido de sódio. O tempo de início de pega foi maior nas pastas com 5% de cimento com valores máximos de 8h53min para a pasta ativada com silicato e hidróxido de sódio e 7h07min para a pasta ativada com hidróxido de sódio. As pastas de cinza volante ativadas com silicato e hidróxido com 10% e 5% de CP apresentaram resistência à compressão média de 43,1 e 43,5 MPa aos 28 dias, cerca de 54% e 65% maior em relação às pastas ativadas com hidróxido de sódio, respectivamente. As alterações morfológicas observadas indicam que a ativação com silicato de sódio e hidróxido de sódio afeta a estrutura das pastas, influenciando suas propriedades físicas.

Palavras-chave: cimento portland; materiais de construção; materiais álcali ativados; mistura; ativadores.

ABSTRACT

Cement is the most commonly used binder in civil construction. However, a significant amount of gaseous pollutants is released into the atmosphere during its manufacturing process. On the other hand, alkali-activated materials have proposed a more efficient use of environmental resources, reducing cement consumption. However, some properties obtained from alkali-activated matrices still do not adequately meet usability standards in civil construction. Therefore, the main objective of this research is to evaluate the effect of adding Portland cement to alkali-activated fly ash pastes through tests of the material in its fresh and hardened state. To achieve this, pastes were prepared containing Portland cement (PC) in proportions of 5% and 10%, activated with a solution of sodium silicate and sodium hydroxide combined, as well as a solution of sodium hydroxide only. In the fresh state, the apparent specific mass, spread diameter through the mini slump test, yield stress, flow time, and initial setting time were evaluated. The mechanical behavior of the paste was assessed through compressive strength testing. An analysis of the microstructure was performed using scanning electron microscopy (SEM). The presence of sodium silicate in the solution increased the apparent specific mass, decreased the yield stress in the paste with 10% cement addition, and increased the spread diameter by 30% compared to the paste containing only sodium hydroxide. The initial setting time was longer in the pastes with 5% cement, with maximum values of 8 hours and 53 minutes for the paste activated with silicate and sodium hydroxide and 7 hours and 7 minutes for the paste activated with sodium hydroxide. The fly ash pastes activated with silicate and hydroxide containing 10% and 5% PC showed average compressive strengths of 43.1 and 43.5 MPa at 28 days, approximately 54% and 65% higher than the pastes activated with sodium hydroxide, respectively. The observed morphological changes indicate that activation with sodium silicate and sodium hydroxide affects the structure of the pastes, influencing their physical properties.

Keywords: portland cement; construction materials; alkali activated materials; mixture; activators.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química, granulometria, área de superfície específica e massa específica da cinza volante.	18
Tabela 2 - Caracterização dos ativadores hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3).	19
Tabela 3 - Matriz experimental da pasta a base de cimento Portland (CP) e cinza volante (CV).	20
Tabela 4 - Resultados do mini-slump, massa específica aparente e tensão de escoamento.	24

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Viscosímetro Copo Ford em PP - Número 8. Modelo: 1800-8 (A); Equipamentos para determinação do tempo de pega (B).	22
Figura 2 - Ruptura de um corpo de prova submetidos ao ensaio de resistência em prensa de compressão axial.	22
Figura 3 - Realização da MEV.	24
Figura 4 - Tempo de escoamento das pastas.	25
Figura 5 - Espalhamento (mini slump) das pastas em função da adição de cimento e de aditivo.	27
Figura 6 - Tempo de início de pega.	27
Figura 7 - Resistência a compressão dos corpos de prova rompidos aos 7 e 28 dias.	28
Figura 8 - Micrografias das pastas de cinza volante contendo cimento e aditivos a base de silicato e hidróxido. CP10HS (A); CP5HS (B); CP10H (C); CP5H (D).	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivo geral	11
1.2	Objetivos específicos	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	Materiais álcali-ativados	12
2.2	Cinzas volantes	12
2.3	Ativadores	15
3	MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1	Materiais	16
3.1.1	<i>Precursor</i>	18
3.1.2	<i>Ativadores</i>	18
3.2	Etapas metodológicas.....	19
3.2.1	<i>Preparação da solução de hidróxido de sódio</i>	19
3.2.2	<i>Mistura e preparação da pasta</i>	19
3.3	Ensaio realizados	20
3.3.1	<i>Massa unitária específica</i>	20
3.3.2	<i>Mini Slump</i>	21
3.3.3	<i>Tensão de escoamento</i>	21
3.3.4	<i>Teste de fluidez</i>	22
3.3.5	<i>Tempo de pega</i>	22
3.3.6	<i>Resistência à compressão</i>	22
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1	Fluidez das pastas	24
4.2	Resistência à compressão	27
4.3	Microscopia eletrônica de varredura	29
5	CONCLUSÃO	31
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland como aglomerante desempenha um papel crucial na união de outros materiais de construção, como a areia, a brita e a água, formando o concreto (Bastos, 2023). Sua importância é fundamental, não apenas na construção civil, mas também na infraestrutura global. Como uma das principais commodities mundiais, o cimento tem sua demanda intrinsecamente ligada ao crescimento econômico e ao desenvolvimento de países ao redor do mundo (Müller; Harnisch, 2008).

Paralelamente à sua importância mundial, a produção de cimento Portland gera impactos ambientais significativos devido ao consumo de matérias-primas, como minerais, à contaminação da água e do solo, e às alterações na fauna e na flora. No entanto, o desenvolvimento da indústria civil impulsionou o avanço das pesquisas em busca de materiais mais sustentáveis, destacando-se os estudos sobre cimentos álcali-ativados, que têm despertado considerável interesse nesse cenário. Esses cimentos constituem uma classe de materiais de construção desenvolvidos como alternativa ao uso do cimento Portland (CP) convencional por apresentarem comportamentos físicos e mecânicos semelhantes ao mesmo (Costa *et al.*, 2022)

Os materiais álcali-ativados são formados pela ativação de materiais precursores usando álcalis, como hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3), em vez do processo de calcinação usado na produção de cimento Portland, no qual ocorrem altas emissões de CO_2 (Pal *et al.*, 2003; Xie *et al.*, 2020).

As cinzas volantes estão entre os materiais precursores mais comuns usados nos materiais álcali-ativados, sendo subprodutos industriais ricos em sílica e alumina (Costa *et al.*, 2023). Ao misturar esse material com álcalis, forma-se uma matriz sólida que tem propriedades de ligação semelhantes às do cimento Portland, permitindo sua utilização como material de construção (Duxson *et al.*, 2007; Nematollahi *et al.*, 2015).

Apesar das inúmeras vantagens, tem sido observada uma considerável variação no tempo de pega inicial de materiais álcali-ativados com cinza volante, influenciada principalmente pelo teor de cálcio presente em sua composição, que pode variar de 5 a 25% (Wijaya *et al.*, 2017).

Atualmente, existem diversas publicações envolvendo a avaliação da resistência e da durabilidade de materiais álcali-ativados, e pesquisadores destacam o uso de pastas à base de cinza volante. Nesse estudo, busca-se avaliar o efeito da adição de

cimento Portland como material suplementar e o efeito do uso aos parâmetros de composição das misturas, como a relação entre os tipos de ativadores.

1.1 Objetivo geral

O objetivo principal da presente pesquisa é avaliar o efeito da adição de cimento Portland como material suplementar à pastas álcali-ativadas de cinza volante, observando incorporações de 5% e 10% de cimento Portland.

1.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar a trabalhabilidade de pastas álcali-ativadas a base de cinza volante;
- b) Avaliar o tempo de pega e a resistência à compressão de pastas no estado endurecido;
- c) Realizar análise da microestrutura de pastas álcali-ativadas à base de cinza volante com incorporações de 5% e 10% de cimento Portland, variando o ativador alcalino.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Materiais álcali-ativados

Os Materiais de Aglomeração Alkali (MAA) geralmente utilizam precursores como cinzas volantes, escórias de alto-forno e metacaulim, que são ricos em sílica e alumina. Esses materiais são ativados principalmente por soluções de hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3), que facilitam a dissolução dos precursores e a formação de gel de aluminossilicato. A combinação de precursores e ativadores não apenas melhora as propriedades mecânicas dos MAA, mas também contribui para a sustentabilidade da construção civil, reduzindo a dependência do cimento Portland e as emissões de carbono associadas à sua produção.

Os materiais álcali-ativados, também conhecidos como geopolímeros ou cimentos geopoliméricos, são originados da policondensação ou polimerização inorgânica de minerais aluminossilicatos em um ambiente altamente alcalino (Azevedo *et al.*, 2017). São produzidos a partir de materiais abundantes em silicatos, que endurecem em temperatura ambiente ou com baixo aquecimento, o que reduz significativamente a liberação de carbono na atmosfera (Duxson, 2007; Shi *et al.*, 2011).

Teoricamente, qualquer material cuja fase predominante seja a sílica e/ou alumina pode ser ativado alcalinamente. No entanto, é crucial considerar alguns parâmetros ao fazer a seleção, uma vez que a reatividade não é assegurada apenas pela composição química. Nesse processo, fatores como teor de material amorfo, superfície específica, teor de fase vítrea e tamanho de partícula são essenciais (Queiroz, 2019).

Esses materiais apresentam várias vantagens, incluindo alta resistência mecânica, resistência ao fogo, baixa condutividade térmica, durabilidade e resistência à corrosão (Araújo, 2020; Castro, 2021; Domingos *et al.*, 2019), tornando-os objeto de pesquisa e desenvolvimento para aplicações na construção civil e na indústria, especialmente em projetos que buscam reduzir impactos ambientais. Entre os materiais mais estudados, destaca-se a cinza volante.

Em relação à matéria-prima, Provis e Deventer (2014) classificam os materiais álcali-ativados de acordo com o teor de cálcio em sua composição, em materiais de

alto teor de cálcio e de baixo teor de cálcio, sendo a cinza volante denominada precursor com baixo teor de cálcio. Essa diferenciação é importante para que sejam estudados métodos de ativação mais eficazes, capazes de melhorar a resistência e a trabalhabilidade das pastas obtidas a partir desses materiais.

2.2 Cinzas volantes

As cinzas volantes, também conhecidas como cinza de sílica ou cinza de carvão pulverizado, são subprodutos da queima de carvão em usinas termelétricas. Elas são capturadas durante a queima de gases, sendo removidas por meio de um sistema de coleta de partículas, utilizando métodos mecânicos ou precipitadores eletrostáticos (Mehta; Monteiro, 2014). A parte capturada por precipitadores eletrostáticos representa cerca de três quartos do total produzido por caldeiras, que são as cinzas volantes. As demais cinzas, que são mais densas e permanecem no fundo da caldeira, são chamadas de cinzas pesadas (Adams, 2017).

As cinzas volantes apresentam partículas esféricas, mais finas que o cimento Portland, com diâmetro que varia entre 1 μm e 100 μm (Cezar, 2011). No entanto, a maior parte dessas partículas, cerca de 50%, é inferior a 20 μm (Isaia, 2007). Essa variação de tamanho ocorre devido ao grau de pulverização do carvão, ao tipo de filtro instalado na usina e ao processo térmico envolvido (Fernández-Jiménez; Palomo, 2003).

Segundo Recena (2011), as partículas das cinzas volantes são constituídas de sílica (SiO_2), além de carbono, mesmo que em pequenas quantidades. Cezar (2011) afirma que, além da sílica, a alumina (Al_2O_3) também faz parte da composição das cinzas, com uma variedade de outros constituintes, dependendo da fonte do carvão e do processo de queima.

Em consequência da variada composição química que podem apresentar, as cinzas volantes desempenham um papel importante em várias aplicações, contribuindo para a construção de estruturas mais duráveis, a melhoria de solos e a gestão de resíduos, ao mesmo tempo em que oferecem uma forma de reciclagem de subprodutos da indústria de energia (Souza *et al.*, 2018; Schwantz *et al.*; 2020; Mallmann, 2020).

Na indústria da construção civil, a cinza volante é utilizada em diversas etapas, entre elas: na estabilização de solos em projetos de engenharia civil, na fabricação de

blocos de concreto e tijolos como parte de suas misturas, melhorando as propriedades físicas e mecânicas desses materiais, e ainda como material aditivo em concretos e argamassas, melhorando a resistência, a durabilidade e a impermeabilidade do concreto, reduzindo também a quantidade de calor gerado durante a hidratação (Santos, 2018; Tonello *et al.*, 2017; Lopes; Silva, 2021).

Uma de suas principais aplicações é como adição mineral, melhorando a trabalhabilidade das misturas cimentícias devido ao formato esférico de suas partículas, além de funcionar como material de substituição parcial ao cimento Portland nas fábricas, a fim de diminuir o impacto ambiental do material. No contexto dos geopolímeros, a cinza volante é aproveitada como uma fonte de aluminossilicatos, viabilizando a incorporação de agregados na pasta, podendo ser realizada com ou sem a utilização de aditivos (Hardjito; Rangan, 2005).

Dois tipos principais de cinza volante geralmente são utilizados: as cinzas volantes Classe F e Classe C. Ambas têm aplicações específicas e características que as tornam adequadas para diferentes usos na indústria da construção. As cinzas volantes categorizadas na Classe F são originárias da queima de carvão betuminoso e, por isso, possuem baixo teor de óxido de cálcio ($\text{CaO} < 10\%$) e, conseqüentemente, não têm propriedades cimentantes. As cinzas classificadas na Classe C, originárias da queima de carvão sub-betuminoso, por possuírem grandes quantidades de CaO ($> 10\%$), apresentam propriedades cimentantes na presença de água (Cezar, 2011).

O estudo demonstrou que o teor de cálcio presente na cinza volante influencia propriedades como o tempo de pega de materiais álcali-ativados. Pastas obtidas com adição de cinzas volantes com percentual de cálcio abaixo de 10% levaram 450 minutos para atingir o tempo inicial de pega, enquanto pastas com teor de cálcio maior que 20% atingiram o tempo inicial de pega em torno de 10 minutos (Wijaya *et al.*, 2017).

A escolha entre cinzas volantes Classe F e Classe C depende das especificações do projeto, das propriedades desejadas do concreto ou do material de construção e da disponibilidade local desses materiais. Ambas as classes de cinzas volantes são valorizadas na construção civil; no entanto, a maioria das cinzas volantes usadas como precursores se enquadra na Classe F (baixo teor de cálcio), conforme definido pelo padrão ASTM C618 (2022). Por outro lado, as cinzas volantes da Classe C (alto teor de cálcio) são usadas com menos frequência em aglutinantes de

geopolímeros devido ao tempo de pega muito rápido e à menor disponibilidade (Provis; Deventer, 2014).

O resultado da pesquisa de Razak *et al.* (2020) mostrou que a porosidade da pasta geopolimérica à base de cinzas volantes apresentou menor área superficial, volume de poros e tamanho de poros em comparação com a pasta de cimento Portland. A maior resistência à compressão do geopolímero à base de cinzas volantes pôde ser alcançada em até 76,723 MPa aos 28 dias, quando foi observado menor tamanho dos poros e absorção de água.

Mehta e Siddique (2017) conduziram uma pesquisa experimental sobre a resistência à compressão e as propriedades de permeação do concreto geopolimérico, utilizando cinzas volantes como componente base, com uma substituição parcial de cimento Portland. Os resultados indicaram que a inclusão de cimento Portland levou à redução da absorção de água e da porosidade, além de proporcionar uma maior resistência à compressão, sendo o teor ideal de até 20%.

Resultados semelhantes foram obtidos por Chen *et al.* (2022), onde observou-se um aumento significativo na resistência à compressão, em torno de 16,08% a 36,61%, com a adição de cimento Portland ao sistema ativado por álcali, tendo como material precursor a cinza volante.

2.3 Ativadores

Para que haja a dissolução dos materiais precursores, é necessário prover ao meio alcalinidade ($\text{pH} > 10$); para isso, são utilizadas soluções alcalinas ativadoras, compostas por íon OH^- e, geralmente, pelos cátions de sódio (Na^+) e potássio (K^+), sendo que o tipo de agente químico ativador empregado para criar o aglomerante tem o poder de afetar as propriedades do produto resultante (Komnistsas; Zahakari, 2007).

O procedimento da ativação alcalina se dá pela liberação de alumínio (Al) e silício (Si) nos precursores com baixo teor de cálcio e de cálcio (Ca) e silício (Si) nos precursores com alto teor de cálcio. Para a formação e estabilização de uma nova estrutura, é necessário um meio fortemente alcalino, de modo a dissolver certa quantidade de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), assim como hidrolisar a superfície das partículas das matérias-primas, sendo necessária também a presença de um cátion na solução, através dos chamados ativadores, para o balanceamento de carga (Severo *et al.*, 2013).

Os ativadores, nesse contexto, podem consistir em hidróxidos alcalinos ou em uma combinação de solução de silicato e hidróxido alcalino. Os mais utilizados são o hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio com silicato de sódio (Severo *et al.*, 2013). O silicato de sódio atua como fonte extra de sílica, enquanto o hidróxido de sódio auxilia na dissolução das fontes de aluminossilicatos (Ramasamy *et al.*, 2015).

Para auxiliar no processo de dissolução dos materiais precursores, muitas vezes são utilizados silicatos solúveis como fonte alcalina. A sílica presente na solução está pronta para reagir, acelerando o processo de reação, diferente do que ocorre quando há utilização de apenas hidróxidos, incrementando a resistência à compressão dos cimentos em relação ao uso exclusivo de hidróxidos (Fernández-Jiménez; Palomo, 2005; Duxson *et al.*, 2007).

Entre as formas de mistura descritas na literatura, encontra-se aquela em que há o ajuste do módulo de sílica (M_s - do silicato de sódio) por meio da dissolução de NaOH (sólido) diretamente na solução de silicato, sem a necessidade de uso de água extra (Rovnaník, 2010; Pelisser, 2013; Aydin; Baradan, 2014; Samson *et al.*, 2017).

Tashima *et al.* (2012) afirmam que a solução alcalina de hidróxido de sódio em argamassas álcali-ativadas, utilizando um precursor que não possua quantidades significativas de Al e Si, não melhora as propriedades mecânicas, devido à ausência de silicato na solução de ativação. Sendo assim, ao utilizar uma solução alcalina composta de hidróxido de sódio e silicato de sódio, obtiveram melhores valores de resistência mecânica nas mesmas condições de temperatura, cura e idade daquelas argamassas ativadas somente por hidróxido de sódio.

Livi (2015) ressalta que o silicato de sódio utilizado na solução alcalina aumenta a disponibilidade de sílica para policondensação, dispensando assim a cura térmica e ainda proporcionando resultados superiores de resistência mecânica. Estudos indicam que cimentos misturados contendo 30% de cimento Portland e 70% de cinzas volantes podem desenvolver maiores resistências mecânicas do que os cimentos padrão (70% cimento Portland + 30% de cinzas volantes), apenas incorporando produtos alcalinos ativadores no sistema (Palomo *et al.*, 2007).

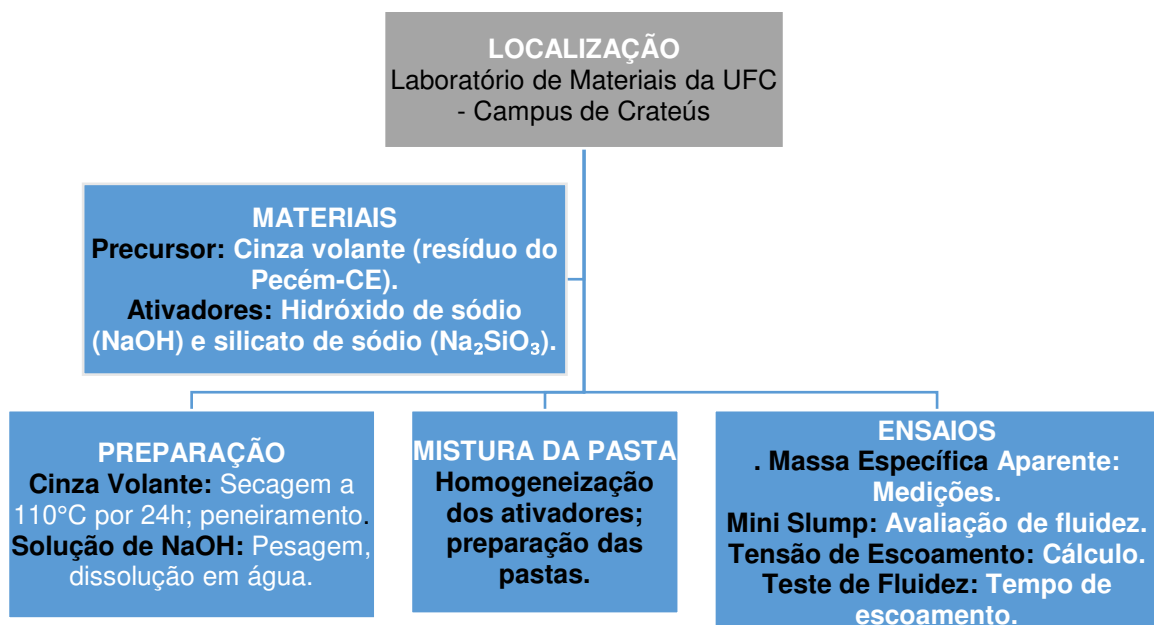
Decorrente de pesquisas e do conhecimento atual sobre ativadores alcalinos, os hidróxidos e silicatos solúveis têm sido os mais utilizados em materiais álcali-ativados (Pacheco-Torgal *et al.*, 2008). No entanto, Bezerra *et al.* (2013) explicam que a escolha do ativador deve estar relacionada às características do precursor utilizado,

já que a concentração do ativador adicionado influencia as propriedades mecânicas dos materiais resultantes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi cuidadosamente conduzido no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, situado no Campus de Crateús. Este laboratório é equipado com infraestrutura moderna e instrumentos avançados, permitindo a realização de análises detalhadas e precisas sobre as propriedades dos materiais utilizados na construção civil. O fluxograma geral resume as etapas da metodologia do estudo realizado no Laboratório de Materiais da Universidade Federal do Ceará - Campus de Crateús. O processo inclui a seleção dos materiais, preparação do precursor e da solução de hidróxido de sódio, e a realização de ensaios para avaliar propriedades como massa específica aparente e resistência à compressão. Os resultados obtidos foram essenciais para entender a eficácia dos materiais e suas aplicações na construção civil.

Fluxograma 1 - Fluxograma geral com resumo e fluxo de todas as etapas adotadas para gerar os resultados do trabalho



Fonte: Autor (2024).

3.1 Materiais

3.1.1 Precursor

A cinza volante foi utilizada como precursor, e trata-se de um resíduo oriundo de atividades industriais geradas na Zona Industrial e Portuária do Pecém-Ce. A composição química, granulometria, massa específica e a área de superfície específica da cinza volante estão apresentadas na Tabela 1. A composição química foi determinada através de uma análise de fluorescência de raio X (FRX) realizada no laboratório de Raio-X do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará (UFC) por Costa (2021).

A granulometria e a área de superfície específica foram obtidos por meio da técnica de difração a laser no laboratório de artefatos de cimento da fábrica de cimento Apodi, unidade de Quixeré-CE. A massa específica dos materiais foi obtida conforme a ABNT NBR NM 53 (2009) no Laboratório de Materiais da Construção Civil da UFC, no campus do Pici (Costa, 2021).

Antes da condução do experimento a cinza volante foi seca em estufa com circulação de ar a 110°C por 24 horas. Em seguida foi destorroada e passada em peneira de nº 100 (150 µm).

Tabela 1 - Características Físico-Químicas da Cinza Volante

Composição química (% de óxidos)														
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MnO	Rb ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	CuO	ZnO	MgO	SrO
41,49	14,49	9,54	24,95	4,54	0,17	-	0,29	0,44	-	3,26	0,11	0,14	-	0,55
Granulometria (µm)														
D10%			D50%			D90%			Dmédio					
1,61 µm			7,37 µm			30,50 µm			13,16 µm					
Área de superfície específica							Massa específica							
17300 cm ² /g							2,18 g/cm ³							

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.1.2 Ativadores

Os ativadores utilizados foram o hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na₂SiO₃). O hidróxido de sódio no estado sólido com concentração de 97%, foi diluído

em água destilada na concentração molar de 10 mol/L. O silicato sódio foi utilizado na forma de solução. A caracterização química do hidróxido de sódio e do silicato de sódio foi informada pelo fabricante do produto e está detalhada na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização dos ativadores hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na₂SiO₃)

NaOH					
Concentração	Sólidos totais (%)	Massa específica (g/cm ³)	Relação H ₂ O/NaOH	H ₂ O (%)	
10 mols/L	30,5	1,30	2,27	69,5	
Na₂SiO₃					
Parâmetros	Na ₂ O (%)	Sólidos Totais (%)	Relação SiO ₂ /Na ₂ O (módulo de sílica)	Massa específica (g/cm ³)	Viscosidade (cp)
Resultados	15,08	47,77	2,21	1,57	1,074

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.2 Etapas metodológicas

3.2.1 Preparação da solução de hidróxido de sódio

O NaOH foi pesado em balança analítica e dissolvido em água destilada. A água foi adicionada de forma fracionada até obter a quantidade desejada de solução. A solução foi, posteriormente, transferida para um balão volumétrico de 500 ml, completando-se o volume com água destilada. A solução foi armazenada em garrafas de plástico até o momento de utilização.

3.2.2 Mistura e preparação da pasta

Inicialmente misturou-se os ativadores até completa homogeneização com 24 horas antes da confecção da pasta. Isso é feito com o objetivo de dissipar o calor gerado no processo de preparação do ativador.

Quatro pastas foram preparadas a partir dos materiais descritos no item anterior, e as matrizes experimentais das pastas estão descritas na Tabela 4. As pastas

foram obtidas da seguinte forma: 10% de cimento Portland + hidróxido de sódio + silicato (CP10HS); 5% de cimento Portland + hidróxido de sódio + silicato (CP5HS); 10% de cimento Portland + hidróxido de sódio (CP10H); e 5% de cimento Portland + hidróxido de sódio (CP5H). Primeiramente, foi feita uma pré-homogeneização manual do ativador com o precursor mais o cimento Portland nas proporções de 5% e 10% da mistura durante 1 minuto. Posteriormente, o misturador planetário foi acionado durante 1 minuto, realizando uma pausa de 1 minuto para retirar o material das paredes do recipiente com o auxílio de uma espátula. Por fim, conclui-se a mistura mecânica por mais 2 minutos.

- **Métodos de Pesquisa:**

- **Parâmetros de Mistura:**

- **Fixos:** relação entre Líquido e Sólido L/S = 0,5; relação hidróxido de sódio e silicato = 1.

- **Variáveis:** Proporção de precursor; ativadores.

Tabela 3 - Matriz experimental da pasta a base de cimento Portland (CP) e cinza volante (CV).

Matriz	CP (%)	CV (%)	Razão NaOH: Na ₂ SiO ₃	*M _{NaOH}
CP10HS	10	90	1:1	10 mol/L
CP5HS	5	95	1:1	10 mol/L
CP10H	10	90	1:0	10 mol/L
CP5H	5	95	1:0	10 mol/L

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.3 Ensaios realizados

3.3.1 Massa específica aparente

A massa específica aparente foi obtida pela Equação 1:

$$p = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Onde, m : massa da pasta (kg).; ρ : massa específica aparente (kg/m^3); v : volume do recipiente (m^3).

3.3.2 Mini Slump

O ensaio de mini abatimento, popularmente conhecido como mini Slump (Kantro, 1980) consiste no preenchimento de um mini cone com a pasta que será analisada, com as seguintes dimensões: 19 mm de diâmetro superior e 39 mm de diâmetro inferior.

O mini cone foi posicionado em cima de uma placa de vidro e logo após preenchido com a pasta. Em seguida, o cone foi retirado de forma rápida e verticalmente para que a pasta pudesse escorrer sobre a superfície. Com o auxílio de um paquímetro, foram feitas a medição de três diâmetros em milímetros, obtendo-se a média dessas três dimensões (Kantro, 1980).

3.3 3 Tensão de escoamento

Esta propriedade refere-se à tensão de cisalhamento necessária para iniciar o escoamento em fluidos não-Newtonianos, como aqueles que podem ser descritos de forma aproximada pelo modelo de fluido de Bingham, de acordo com Roussel e Coussot (2005) e Tan, Bernal e Provis (2017). Com base nos resultados do teste de mini-slump e da massa específica aparente, a tensão de escoamento foi estimada conforme a Equação 2:

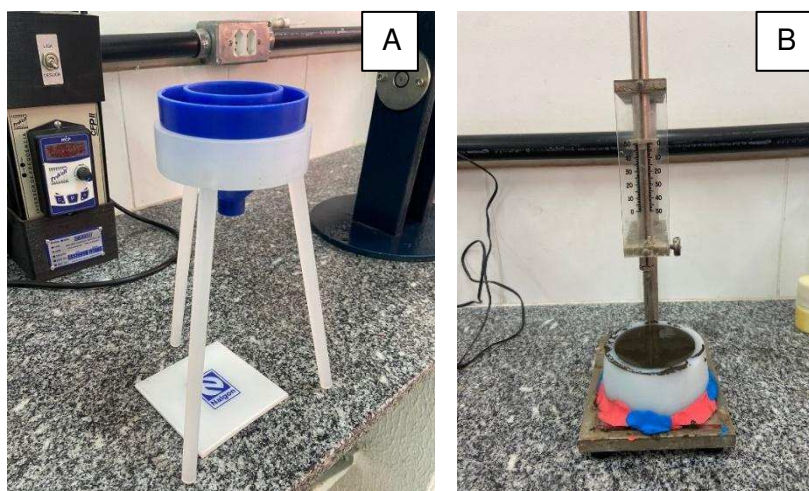
$$\tau_0 = \frac{225\rho g\Omega^2}{128}\pi^2 R^5 \quad (2)$$

Onde, τ_0 : tensão de escoamento (Pa); ρ : massa específica aparente (kg/m^3); g : aceleração da gravidade (9.81 m/s^2); Ω : volume do mini-slump (m^3); R : raio de espalhamento.

3.3.4 Teste de fluidez

Após preparar as pastas, encheu-se um viscosímetro tipo copo Ford, de material polipropileno e diâmetro do orifício de 8mm (Figura 2A) com a mistura até a borda, nivelando-a com uma espátula para remover o excesso e garantir a quantidade padronizada de pasta. Em seguida, a abertura inferior, inicialmente bloqueada, foi liberada, e o tempo que a pasta levou para escoar foi cronometrado, aferindo-se o diâmetro de espalhamento a cada 1 minuto, com os resultados expresso em mm.

Figura 1 - Viscosímetro Copo Ford em PP - Número 8. Modelo: 1800-8 (A); Equipamentos para determinação do tempo de pega (B).



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.3.5 Tempo de pega

Em cada pasta foram realizados os ensaios de início de pega. Para determinação dos tempos de pega seguiu-se as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 16607 (2018), com o uso do aparelho de Vicat com a agulha correspondente ao tempo de pega que se pretende determinar.

3.3.6 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada conforme a norma NBR 16738 (ABNT, 2019), utilizando moldes cúbicos com arestas de 4 cm. Os corpos de prova foram rompidos aos 7 e 28 dias, e os resultados de resistência à compressão foram

expressos em Mpa. Esses resultados correspondem a média dos valores de resistência à compressão de três corpos de prova. Para evitar a retração por secagem devido a uma perda de umidade excessiva, os corpos de prova desmoldados foram armazenados em sacos de plásticos até o dia da realização do ensaio de ruptura.

Figura 2 - Teste de Ruptura em Corpo de Prova na Prensa de Compressão Axial



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.3.7 Análise microestrutural

A microestrutura das amostras rompidas foi caracterizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Figura 5), realizada no departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC). Os equipamentos utilizados foram o MEV Hitachi TM3000 com EDS Swift ED3000.

Figura 3 - Realização da MEV



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fluidez das pastas

A Tabela 4 apresenta os dados da massa específica aparente no estado fresco, do diâmetro de espalhamento médio no mini-slump e da tensão de escoamento estimada das pastas.

As pastas CP10HS e CP5HS apresentaram uma massa específica aparente de 2,08 e 2,04 g/cm³, maiores em cerca de 5 e 4% em comparação com as misturas contendo apenas hidróxido (CP10H e CP5H), respectivamente. Isso indica que a presença do silicato pode ter contribuído para o aumento da densidade da pasta. No entanto, as misturas apresentaram uma massa específica aparente muito próximas, independentemente das quantidades de cimento (Tabela 4).

O espalhamento no mini-slump mostra valores maiores para as pastas CP10HS e CP5HS, com valores médios de 121,3 mm e 120,9 mm, respectivamente em comparação com as pastas CP10H e CP5H (85,0 mm e 96,7 mm, respectivamente).

A tensão de escoamento é baixa nas pastas com hidróxido + silicato (0,2 Pa para ambas as concentrações de cimento), refletindo a maior fluidez observada no mini-slump. Por outro lado, a tensão de escoamento diminuiu à medida que a quantidade de cimento foi reduzida nas pastas contendo apenas hidróxido de sódio, com valores médios de 1,2 Pa e 0,7 Pa para os teores de 10 e 5% de cimento, respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4 - Resultados do mini-slump, massa específica aparente e tensão de escoamento

Pasta	Massa específica aparente (g/cm ³)	Espalhamento médio no mini-slump (mm)	Tensão de escoamento (Pa)
CP10HS	2,08	121,3	0,2
CP5HS	2,04	120,9	0,2
CP10H	1,98	85,0	1,2
CP5H	1,97	96,7	0,7

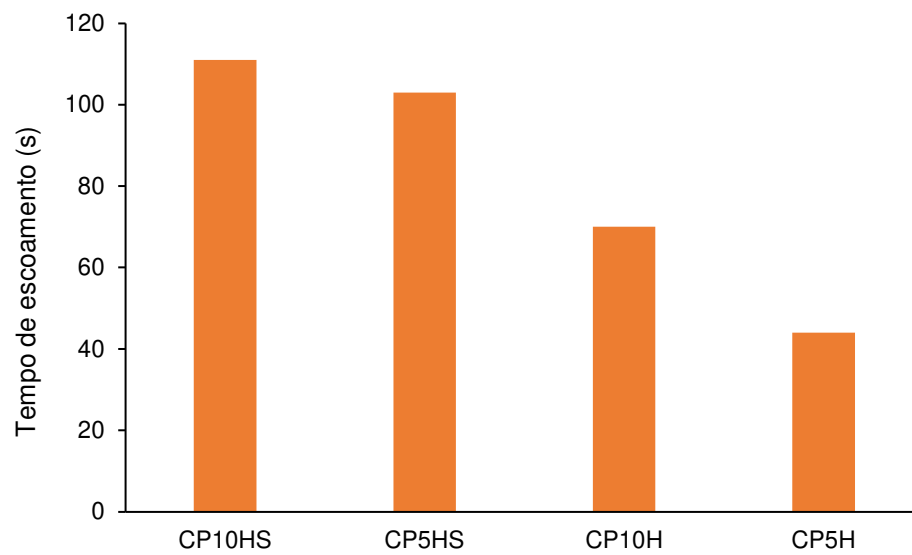
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A comparação entre o tempo de escoamento (Figura 6) e a tensão de escoamento (Tabela 4) em pastas de cinza volante e cimento, ativadas com hidróxido e silicato de sódio, indicam que o uso de silicato de sódio tende a aumentar o tempo de escoamento, provavelmente devido à formação de uma estrutura menos rígida nas pastas, o que implica que uma menor tensão de escoamento seja necessária para que o material comece a fluir (Alnahhal *et al.* 2020; Jonh; Thomas, 2024).

Os resultados encontrados na literatura, e observados no presente estudo, indicam que a adição de silicato de sódio tem um papel fundamental na melhora da fluidez e na redução da tensão de escoamento, atuando como um agente dispersante eficaz (Meng *et al.*, 2023; Gao *et al.*, 2024). Por outro lado, o hidróxido de sódio, quando utilizado isoladamente, resulta em pastas mais viscosas e coesas (Dong *et al.*, 2023).

Em relação ao tempo de fluidez, as pastas CP10HS e CP5HS apresentaram os maiores tempos de escoamento (111 e 103 segundos, respectivamente). Por outro lado, a redução na concentração de 10% para 5% resultou em uma pequena redução no tempo de escoamento. A pasta CP5H apresentou o menor tempo de escoamento médio, de apenas 44 segundos (Figura 6).

Figura 4 - Tempo de escoamento das pastas

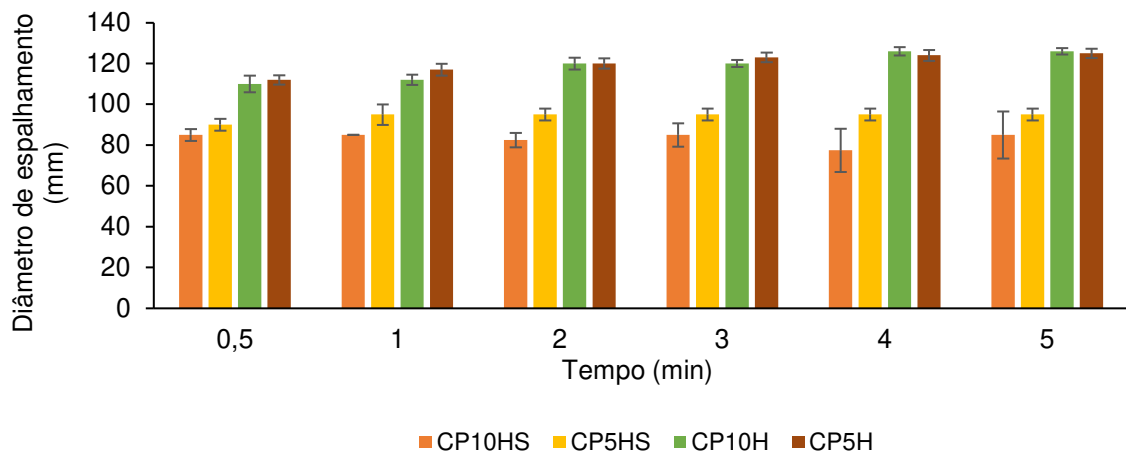


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os resultados no teste de mini-slump sugerem diferentes comportamentos de fluidez e estabilidade das pastas (Figura 7). Para a pasta CP10HS os valores de espalhamento aumentam progressivamente com o tempo, começando em 110 mm aos 0,5 minutos e chegando a 126 mm aos 5 minutos. Para a pasta CP5HS, o comportamento é semelhante ao da mistura com CP10HS, com um aumento nos valores de 112 mm a 125 mm ao longo de 5 minutos. No entanto, esses valores são ligeiramente maiores no início e alcançam um valor final próximo ao da composição de CP10HS (Figura 7).

Para a pasta CP10H, o valor de espalhamento permanece constante em 85 mm ao longo de todo o período de 5 minutos. Para a pasta CP5H, similar ao comportamento da mistura com CP10H, os valores permanecem estáveis, embora ligeiramente mais elevados, variando de 90 mm a 95 mm (Figura 7).

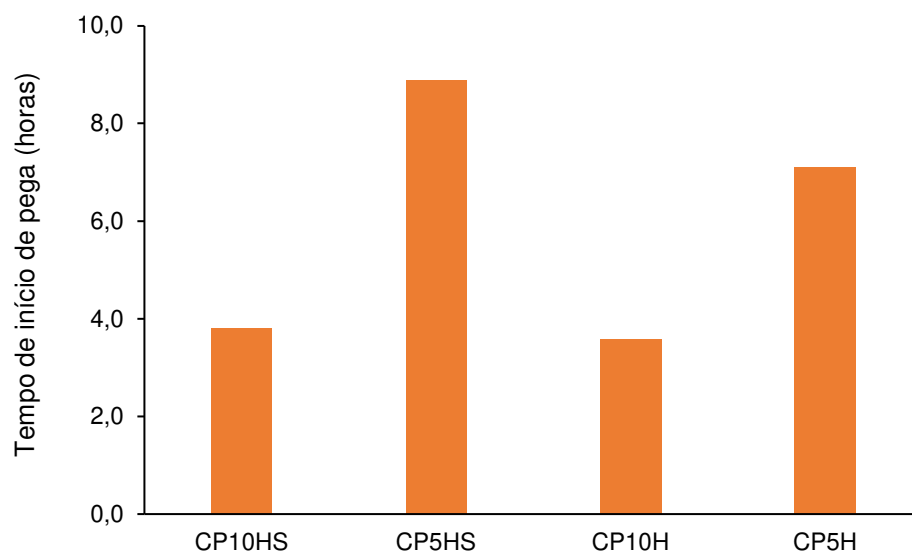
Figura 5 - Espalhamento (mini slump) das pastas em função da adição de cimento e de aditivo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para o tempo de início de pega, a pasta contendo CP10HS e CP5HS apresentou início de pegas após 3h50min e 8h53min respectivamente, indicando que a redução da quantidade de cimento (de 10% para 5%) aumentou o tempo de pega em aproximadamente 59% (Figura 6).

Figura 6 - Tempo de início de pega



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Entre os principais fatores que influenciam o tempo de pega das pastas, destacam-se o tipo e a composição das matérias-primas utilizadas, bem como os

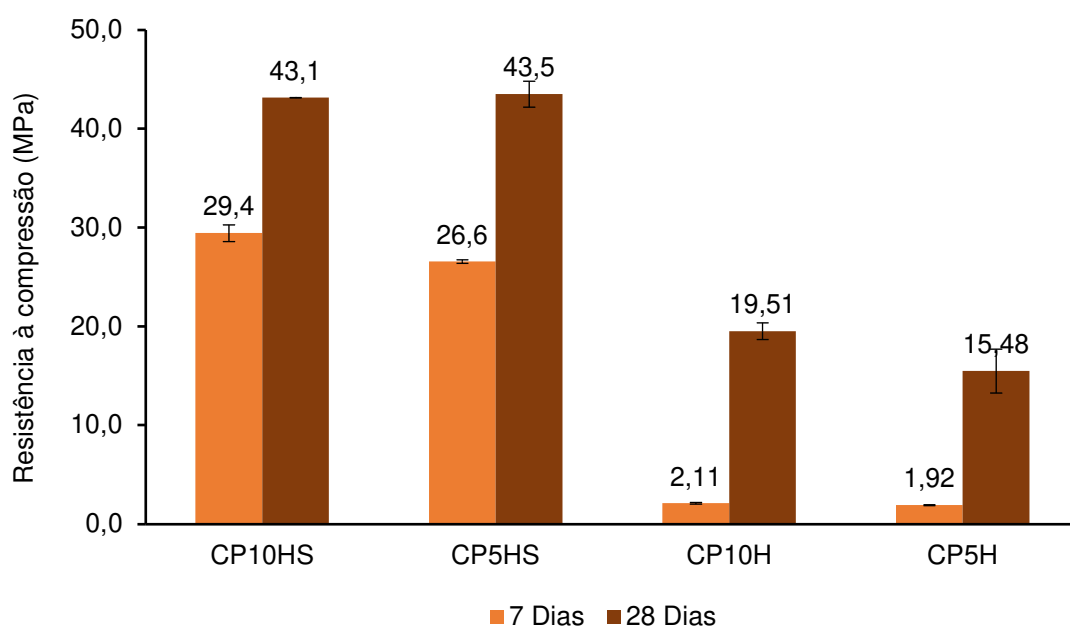
ativadores escolhidos. No presente estudo, a adição de até 10% de cimento, independente da adição de silicato na solução ativadora, elevou o teor de Ca^{2+} na mistura, que Segundo Dong *et al.* (2023), pode participar da reação de ativação alcalina, acelerando a taxa de hidratação e encurtando o tempo de pega.

4.2 Resistência à compressão

A resistência a compressão dos corpos de provas rompidos aos 28 dias foi superior à dos corpos de prova rompidos aos 7 dias, com as pastas contendo 5 e 10% de cimento Portland ativadas com hidróxido de sódio e silicato de sódio ligeiramente superiores as pastas contendo apenas hidróxido de sódio (Figura 7). Apesar da menor resistência aos 7 dias, os valores obtidos nesse período correspondem a 70% da resistência obtida aos 28 dias, para as pastas CP10HS e CP5HS.

Pode-se observar que as pastas contendo hidróxido de sódio e silicato de sódio, na proporção de 5 e 10% de cimento Portland apresentaram uma resistência de 43,1 e 43,5 MPa, respectivamente, aos 28 dias. Por outro lado, quando a quantidade de cimento foi reduzida na pasta contendo apenas hidróxido (CP5H), a resistência diminuiu 20% em relação a pasta contendo cimento Portland na proporção de 10% (CP10H) aos 28 dias (Figura 7).

Figura 7 - Resistência a compressão dos corpos de prova rompidos aos 7 e 28 dias



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

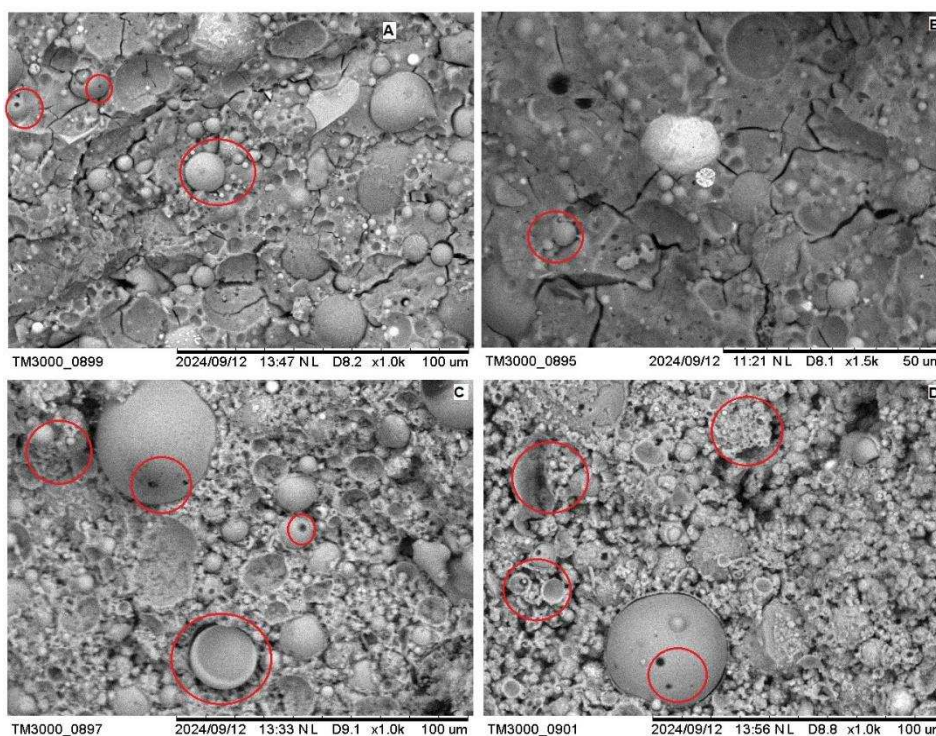
Tashima *et al.* (2012) obtiveram uma resistência a compressão de 68 MPa quando se aumentou a proporção de silicato na pasta, em comparação as pastas contendo apenas óxido de sódio. Lima *et al.* (2022), avaliando o comportamento de argamassas álcali-ativadas com uma solução de silicato de sódio e hidróxido de sódio à base de cinza volante registraram uma resistência a compressão máxima de 33,3 MPa.

Nesse contexto, as pastas álcali-ativadas avaliadas nesse estudo, adicionadas cimento Portland nas proporções de 5 e 10%, utilizando como ativadores o hidróxido de sódio juntamente com o silicato de sódio apresentaram resistência superior, podendo, portanto, ser indicadas para uso na construção civil por atender ao requisito mínimo de resistência.

4.3 Microscopia eletrônica de varredura

A Figura 8 mostra o aspecto morfológico das pastas contendo cinza volante, cimento e os ativadores silicato de sódio e/ou hidróxido de sódio, a partir da micrografia obtida no MEV. É possível observar a presença partículas esféricas e de diâmetro variado, que são características da cinza volante (Costa *et al.*, 2022; Park *et al.*, 2006). Segundo Camacho *et al.* (2018), as esferas podem ser ocas ou conter partículas de menor dimensão em seu interior. Em todas as Figuras é possível perceber a presença de esferas intactas, com pequenas aberturas na superfície (A, C e D), mas nas figuras C e D, essas esferas apresentam a morfologia alterada, com partículas achatadas. Nas Figuras A e B pode-se observar a presença de fissuras no sistema, que podem ter sido causadas por compressão e retração pela perda de água (Palomo *et al.*, 1999).

Figura 8 - Micrografias das pastas de cinza volante contendo cimento e aditivos a base de silicato e hidróxido. CP10HS (A); CP5HS (B); CP10H (C); CP5H (D)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Durante o processo de ativação alcalina, os produtos de gel gerados são cimentados juntamente com as cinzas volantes não reagidas, nas quais substâncias floculentas, em forma de agulha e/ou em forma de placa, e ativadores alcalinos estão aderidos às esferas de cinzas volantes ou preenchendo os poros e entrelaçados para formar uma estrutura em rede ((Fernández-Jiménez; Palomo, 2005; Qingfeng *et al.*, 2021).

Qingfeng *et al.* (2021) ao estudarem a microestrutura de um geopolímero à base de cinzas volantes ativado por silicato de sódio, observaram que, em uma menor dosagem do ativador, a quantidade de cinzas volantes não reagidas no sistema é alta, apresentando grandes poros e estrutura solta, envolvidas pelos produtos de gel; e, na medida que a dosagem aumenta, a integridade do sistema aumenta gradualmente, onde os produtos de gel de hidratação passam de flocos e camadas para uma estrutura contínua, com uma grande quantidade de esferas de cinzas volantes participando da reação, e os poros gerados pela dissolução das cinzas volantes gradualmente desaparecem.

5 CONCLUSÃO

A conclusão do estudo destaca a relevância da incorporação de cimento Portland em pastas álcali-ativadas à base de cinza volante, evidenciando não apenas os resultados obtidos, mas também suas implicações para futuros trabalhos na área.

Os resultados mostraram que as pastas contendo 10% e 5% de cimento Portland, ativadas com hidróxido e silicato de sódio, apresentaram resistências à compressão de 43,1 e 43,5 MPa, demonstrando um desempenho notável em comparação às misturas ativadas apenas com hidróxido de sódio, que alcançaram 19,51 e 15,48 MPa. Além disso, a maior massa específica aparente das misturas com maior teor de cimento, juntamente com tempos de pega reduzidos, sugere um potencial aprimoramento nas propriedades mecânicas e na eficiência do processo de aplicação dessas pastas.

As implicações deste estudo são significativas, uma vez que a utilização de cinza volante em combinação com cimento Portland pode contribuir para a sustentabilidade na construção civil, ao aproveitar resíduos industriais e reduzir a dependência de materiais convencionais. Além disso, as melhorias na trabalhabilidade e resistência das pastas álcali-ativadas ressaltam a importância de explorar diferentes proporções e combinações de ativadores para otimizar as propriedades dos materiais.

Futuros trabalhos podem se beneficiar da análise mais aprofundada das interações entre os componentes das misturas, bem como do impacto de outros tipos de aditivos que possam aprimorar ainda mais as características das pastas. Investigações adicionais sobre a durabilidade e resistência a diferentes condições ambientais também são essenciais para estabelecer diretrizes que incentivem a adoção dessas soluções inovadoras no mercado.

Em suma, a continuidade das pesquisas nesse campo poderá trazer avanços significativos para a engenharia de materiais, promovendo práticas mais sustentáveis e eficientes na construção civil.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, T. H. **Coal ash recycling reaches record 56 percent amid shifting production and use patterns**. Washington, D.C.: [s.n.], 2017. Disponível em: <https://astswmo.org/files/Resources/CCR/Coal-Ash-Production-and-Use-2017.pdf>. Acesso em: 10 maio 2024.
- ALNAHHAL, M. F.; KIM, T.; HAJIMOHAMMADI, A. Evolution of Flow Properties, Plastic Viscosity, and Yield Stress of Alkali-Activated Fly ash/Slag Pastes. **RILEM Tech Lett**, v. 5, p. 141-149. 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C618**: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. West Conshohocken: ASTM International, 2022.
- ARAÚJO, R. C.A. **Concreto de alta resistência à base de escória álcali-ativada em situação de incêndio**. 2020. 109 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16738**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
- AYDIN, S.; BARADAN, B. Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars. **Composites Part B: Engineering**, v. 57, p.166-172, 2014.
- AZEVEDO, A.G.S.; STRECKER, K.; LOMBARDI, C.T. Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha, **Cerâmica**, v. 64, n. 371, pp. 388–396, 2018.
- BASTOS, P. S. D. S. **Fundamentos do concreto armado**. Bauru: UNESP. 2023.
- BEZERRA, I. M. T. *et al.* (2013). Influência da proporção do ativador alcalino nas propriedades mecânicas de materiais ativados alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 2, n. 8, p.101-105, 2013.
- CAI, J.; PAN, J.; LI, X.; Electrical resistivity of fly ash and metakaolin based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 827-868, 2020.
- CAMACHO, A. L. D.; CAMACHO, D. L. D.; MANCIO, M. Avaliação do aumento da reatividade da cinza volante através do método sonoquímico. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, 2018.

CASTRO, P. B. **Avaliação do comportamento mecânico e da durabilidade de argamassas álcali-ativadas para uso como material de reparo**. 2021. 240 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021.

CESARI, V. F. **Influência do uso de aditivos e dispersantes em pastas de geopolímeros produzido com cinza volante e hidróxido de sódio**. 2015. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro Tecnológico. Florianópolis. 2015.

CEZAR, D. de S. **Características de durabilidade de concretos com cinzas volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento**. 2011. 143 f. Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia. Santa Maria, 2011.

CHEN, H., *et al.* Compressive strength prediction and low-carbon optimization of fly ash geopolymer concrete based on big data and ensemble learning. **Plos one**, v. 17, n.3, p. e0265912. 2022.

COSTA, H. N.; CABRAL, A. E. B.; NOGUEIRA, R. E. F. Q. Cimento álcali-ativado. In: ANDRADE, P. L.; RIBEIRO, I. M. (org.) **Ciência e engenharia de materiais: princípios e fundamentos em pesquisa**. 2. ed. Guarujá-SP: Científica Digital, 2022. 182 p.

COSTA, H.N.; NOBERTO, C.C.; ALMEIDA, L.A; NOGUEIRA, R.E.F.Q.; CABRAL, A.E.B. Alkaline activation of cement pastes with desulfurization slag. **Cerâmica**, v. 67, p.399- 405, 2021.

DESCHNER, F.; LOTHENBACH, B.; WINNEFELD, F.; NEAUBAUER J. Effect of temperature on the hydration of Portland cement blended with siliceous fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 52, p. 169–181, 2013.

DOMINGOS, L. F. T.; AZEVEDO, A. G. S.; STRECKER, K. **Estudo de corrosão em geopolímeros à base de cinza volante**. In: IX Congresso de Engenharias da Universidade Federal de São João Del-Rei, 2019, São João Del-Rei. **Anais eletrônicos...** Campinas, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/coen-2019/trabalhos/estudo-de-corrosao-em-geopolimeros-a-base-de-cinza-volante?lang=pt-br>. Acesso em: 19 set. 2023.

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, p.696. 2023.

DUXSON, P.; DUXSON, P.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1590–1597, 2007.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO. A. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 10. p. 1984-1992, 2005.

GAO L, REN L, WAN X, JIN Z, WANG H. Effects of Sodium Silicate Alkali Sludge on the Rheological and Mechanical Properties of an Alkali-Activated Slag System. **Sustainability**, v. 6, n. 1, 2024.

HARDJITO, D.; RANGAN, B. V. **Development and properties of low-calcium Fly Ash Based geopolymer concrete**. Perth: Curtin University of Technology, 2005. 104p.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. 2. E.d. 1712p.

JOHN, V.T.; THOMAS, R.M. Optimising Compressive Strength: Investigating the Ideal Conditions for Sodium Silicate-Activated Fly Ash–GGBS-Based Binder. **Iran Journal Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, v. 48, p. 2061–2076, 2024.

KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. **Minerals Engineering**, v. 20, v.14, p. 1261-1277, 2007.

LIMA, L. P.; DIÓGENES, D. G.; CABRAL, E. B.; NOGUEIRA, R. E. F. Q.; COSTA, H. N. Comportamento no estado fresco e no estado endurecido de argamassas álcali-ativadas à base de cinza volante curadas em temperatura ambiente. **Revista Matéria**, v. 27, n. 3, p. e20220060, 2022.

LIVI, C. N.; REPETTE, W. L. Ligante geopolimérico produzido com cinza volante e hidróxido de sódio. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 3, p. 7–18, 2015.

LOPES, D. F.; SILVA, S. N. Avaliação das propriedades de argamassas cimentícias com adição de resíduos da geração termoelétrica. **Revista Matéria**, v. 26, n. 4, p. e13100, 2021.

MALLMANN, A. M. **Análise de Solo Modificado com Cinza Volante Para Dimensionamento de Pavimentos**. 2020. Dissertação de Mestrado. Instituto Politécnico de Leiria (Portugal).

MEHTA, A.; SIDDIQUE, R. Properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete incorporating OPC as partial replacement of fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 792-807, 2017.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MENG J, FALL M, POUR HM. Deeper Understanding of the Strength Evolution and Deformation Characteristics of Sodium Silicate–Cemented Paste Tailing Material. **Minerals**, v. 13, n. 11, 2023.

MÜLLER, C.; HARNISCH, J. A blueprint for a climate friendly cement industry. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 2, p. 559-566, 2008.

NEMATOLLAHI, B.; SANJAYAN, J.; SHAIKH, F. U. A. Synthesis of heat and ambient cured one-part geopolymer mixes with different grades of sodium silicate. **Ceramics International**, v. 41, p. 5696–5704, 2015.

PACHECO-TORGAL, F.; ABDOLLAHNEJAD, Z.; CAMÕES, A. F.; JAMSHIDI, M.; DING, Y. Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over Portland cement or an unproven issue? **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 400-405, 2012.

PAL, S. C.; MUKHERJEE, A.; PATHAK, S. R. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 9, p. 1481–1486, 2003.

PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; KOVALCHUK, G. U.; ORDONEZ, L. M. Opc-fly ash cementitious systems: Study of gel binders produced during alkaline hydration. **Journal of Material Science**, v. 42, p. 2958–2966, 2007.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M.W.; BLANCO, M.T. Alkali-activated fly ashes - A cement for the future. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, p. 1323-1329, 1999.

PARK, S.S.; KANG, H.Y. Strength and microscopic characteristics of alkali-activated fly ash-cement. **Korean Journal of chemical engineering**, v. 23, p. 367-373, 2006.

PELISSER, F.; GUERRINO, E.L.; MENGER, M.; MICHEL, M.D.; LABRINCHA, J.A. Micromechanical characterization of metakaolinbased geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 49, p.547-553, 2013.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. **Alkali activated materials: State of Art Report, Rilem Tc 224**. Dordrecht: Springer, 2014. 402p.

QINGFENG, L. V. *et al.* Mechanical property and microstructure of fly ash-based geopolymer activated by sodium silicate. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 25, p. 1765-1777, 2021.

QUEIROZ, L. C. **Cimentação de Areia a Partir de Sistemas Ligantes Alcali-Ativados**. 2019. 97 f. Dissertação. Programa de Pós – Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RAMASAMY, S.; KAMARUDIN, H.; MUSTAFA, M.; ABDULLAH, M. M. A. B. Recent Dissertations on kaolin based geopolymer materials, **Reviews on Advanced Materials Science**, v. 42, n. 1, p. 83-91, 2015.

RAZAK, S.; ZAINAL, F.F.; SHAMSUDIN, S.R. Effect of Porosity and Water Absorption on Compressive Strength of Fly Ash based Geopolymer and OPC Paste. *In: Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; IOP Publishing: Bristol, UK, v. 957, 2020. p. 012035.

RECENA, F. A. P. **Método de dosagem de concreto pelo volume de pasta com emprego de cinza volante**. 2011. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia. Porto Alegre, 2011.

ROUSSEL, N.; COUSSOT, Philippe. “Fifty-cent rheometer” for yield stress measurements: from slump to spreading flow. **Journal of rheology**, v. 49, n. 3, p. 705-718, 2005.

ROVNANÍK, P. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 7, p.1176-1183, 2010.

SAMSON, G.; CYR, M.; GAO, X. Formulation and characterization of blended alkali-activated materials based on flash-calcined metakaolin, fly ash and GGBS. **Construction and Building Materials**, v. 144, p.50-64, 2017.

SANTOS, C. P. **Estabilização de solos: Adição de cal e cinza volante a um solo argiloso de Bom Retiro do Sul**. 2018. Monografia (Graduação). Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2018.

SEVERO, C. G. S.; COSTA, D. L.; BEZERRA, I. M. T.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A. Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 8, n.2, p.55 –67, 2013.

SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 750–763, 2011.

SILVA NETO, J. A. **Influência da concentração alcalina (NaOH) e razão dos reagentes alcalinos ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) em concreto álcali-ativado de base metacaulim**. 2021. Dissertação. 161 f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, 2021.

SCHWANTZ, M. D. C et al. Avaliação do ciclo de vida de um solo melhorado com cal dolomítica e cinza volante. In: XXIX Congresso de Iniciação Científica, 2020, **Anais...6ª** Semana Integrada, UFPEL, Pelotas, 2020.

SOUZA, M. R et al. **Melhoramento de um solo siltoso com adição de cinza leve oriunda de termoeletrônica**. 2018. Monografia. 11 f. Curso de Engenharia Civil. Universidade do Extremo Sul Catarinense, Santa Catarina, 2018.

TAN, Z.; BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L. Reproducible mini-slump test procedure for measuring the yield stress of cementitious pastes. **Materials and Structures**, v. 50, p. 1-12, 2017.

TASHIMA, M. M.; AKASAKI, J. L.; CASTALDELLI, V. N.; SORIANO, L.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J.; BORRACHERO, M. V. New geopolymeric binder based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC), **Materials Letters**, v. 80, p. 50-52, 2012.

TONELLO, R. D.; ARTUSI, R. A. A.; DONATO, M. Substituição de cimento portland por cinza volante na produção de blocos de concreto celular espumoso. **Revista CIATEC-UPF**, v. 9, n.1, p.67-74, 2017.

WEDDING, P.; KANTRO, D. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste -a miniature slump test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95, 1980.

WIJAYA, A. L.; EKAPUTRI, J. J.; TRIWULAN. Factors influencing strength and setting time of fly ash based-geopolymer paste. **MATEC Web of Conferences**, v. 138, p. 01010, 2017.

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**, v. 256, p. 119380, 2020.