



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MANOEL ADRIELTON MACEDO MOREIRA

**AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE
PASTAS CIMENTÍCIAS ÁLCALI-ATIVADAS COM USO DE ADITIVOS
TENSOATIVOS**

CRATEÚS

2022

MANOEL ADRIELTON MACEDO MOREIRA

AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE
PASTAS CIMENTÍCIAS ÁLCALI-ATIVADAS COM USO DE ADITIVOS TENSOATIVOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Heloína Nogueira da
Costa

CRATEÚS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M838a Moreira, Manoel Adrielton Macedo.
Avaliação da trabalhabilidade e resistência à compressão de pastas cimentícias álcali-ativadas com uso de aditivos tensoativos / Manoel Adrielton Macedo Moreira. – 2022.
59 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2022.
Orientação: Profa. Dra. Heloína Nogueira da Costa.
1. Cimento álcali-ativado. 2. Cinza Volante. 3. Escória de aciaria BOF. 4. Trabalhabilidade . 5. Resistência à compressão . I. Título.

CDD 620

MANOEL ADRIELTON MACEDO MOREIRA

AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE
PASTAS CIMENTÍCIAS ÁLCALI-AATIVADAS COM USO DE ADITIVOS TENSOATIVOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Civil.

Aprovada em: ___ / ___ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Heloína Nogueira da Costa (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Engº. Lucas Benício Rodrigues Araújo
Faculdade Cisne - Quixadá

Prof. Ma. Tatiane Lima Batista
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me permitir viver e concluir esse processo e tantos outros que me trouxeram até aqui. Sem Ele, nada faria sentido.

À minha família, em especial aos meus pais, pelo apoio e incentivo. Por acreditarem em mim, e não medirem esforços para a concretização desse sonho. Foi uma trajetória árdua, mas sem vocês seria algo impossível.

À professora e orientadora Doutora Heloína Nogueira da Costa, que é um ser incrível por quem possuo enorme admiração. Tanto pela pessoa que é, quanto pelas suas conquistas. Crateús tem muito privilegio por ter em seu quadro de profissionais alguém tão competente e que tem o dom de transmitir o que sabe. Muito obrigado por me apresentar o mundo dos cimentos álcali-ativados. Ter uma orientadora como a senhora foi um privilégio. Qualquer agradecimento feito será pouco pelo que fez por mim, serei eternamente grato pela constate disponibilidade, pela partilha de sabedoria e pela orientação no verdadeiro sentido da palavra.

Ao meu amor e a sua família, por tudo que fizeram e fazem por mim. Obrigado por tantas vezes ter aberto mão de minha presença em prol da finalização desse trabalho e por partilhar sua vida comigo.

Aos professores participantes da banca examinadora Dra. Heloína Nogueira da Costa, Ma. Tatiane Lima Batista e Lucas Benício Rodrigues Araújo pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A todos os profissionais que fazem parte da Universidade Federal do Ceará. Todos foram muito importantes para que esse momento fosse possível. Em especial, gostaria de agradecer ao professor Sandro Vagner por ter me apresentado o incrível mundo da pesquisa. É motivo de muito orgulho ter tido a oportunidade de trabalhar com alguém tão brilhante.

É necessário dedicar um agradecimento especial aos Laboratórios de Materiais de Construção Civil e de Ligantes Asfálticos da universidade. Seus técnicos deram a assistência necessária quando solicitada, além de terem disponibilizado o espaço para a realização dessa pesquisa.

Aos colegas de labuta, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação”

Simone de Beauvoir

RESUMO

O cimento Portland é o material aglomerante mais utilizado na produção de argamassas e concretos. Entretanto, seu uso está associado à elevadas taxas de CO₂ liberadas ao longo de sua cadeia produtiva, extração de matéria-prima não renovável e geração de resíduos sólidos. Em vista disso, a academia tem avançado em estudos em materiais que visam uma substituição, parcial ou completa, desse aglomerante. Dentre eles, os cimentos álcali-ativados têm se mostrado como uma importante alternativa para mitigar os efeitos negativos da indústria do cimento. Sendo assim, o presente estudo apresenta enfoque numa avaliação da trabalhabilidade de pastas cimentícias álcali-ativadas com uso de aditivos tensoativos. As pastas foram produzidas a partir da mistura dos precursores compostos por Cinzas Volantes (CV) e escória de aciaria tipo Basic Oxygen Furnace (BOF) interagindo com ativadores alcalinos compostos por uma mistura de hidróxido de sódio e silicato de sódio. A composição da pasta é pré-definida e indicada ao longo do trabalho, variando a dosagem dos aditivos tensoativos utilizados para uma análise da influência deste nas propriedades da pasta, tais como a trabalhabilidade, o tempo de pega e a resistência à compressão. A pesquisa realizada se enquadra como uma pesquisa explicativa, quantitativa e experimental. A abordagem experimental adotada baseou-se na determinação das propriedades mecânicas e no estado fresco. Através dos ensaios realizados pôde-se observar que o aditivo superplastificante à base de policarboxilato melhorou a trabalhabilidade das pastas. O aditivo plastificante à base de sais sulfonados também apresentou índices de aumento do diâmetro de espalhamento. No tocante ao tempo de pega, os aditivos tensoativos possibilitaram uma redução no tempo de pega final da pasta, atuando como aceleradores de pega nas condições estudadas. Os aditivos tensoativos também influenciaram negativamente na resistência à compressão das pastas, visto que ocorreu uma diminuição do índice nas pastas que continham aditivo em sua composição.

Palavras-chave: Cimento álcali-ativado. Aglomerante. Cinza volante. Escória de aciaria BOF. Trabalhabilidade. Tempo de pega. Resistência à compressão.

ABSTRACT

Portland cement is the most used binder material in the production of mortars and concretes. However, its use is associated with high rates of CO₂ released along its production chain, extraction of non-renewable raw materials and generation of solid waste. In view of this, the academy has advanced in studies on materials aimed at a partial or complete replacement of this binder. Among them, alkali-activated cements have been shown to be an important alternative to mitigate the negative effects of the cement industry. Therefore, the present study focuses on an evaluation of the workability of alkali-activated cementitious pastes using surface-active additives. The pastes were produced from the mixture of precursors composed of Fly Ash and Basic Oxygen Furnace steel slag interacting with alkaline activators composed of a mixture of sodium hydroxide and sodium silicate. The composition of the paste is pre-defined and indicated throughout the work, varying the dosage of the surfactant additives used for an analysis of its influence on the properties of the paste, such as workability, setting time and compressive strength. The research carried out fits as an explanatory, quantitative and experimental research. The experimental approach adopted was based on the determination of the mechanical properties and the fresh state. Through the test carried out, it was possible to observe that the superplasticizer additive based on polycarboxylate improved the workability of the pastes. The plasticizer additive based on sulfonated salts also showed an increase in the spreading diameter. Regarding the setting time, the surfactant additives allowed a reduction in the final setting time of the paste, acting as setting accelerators under the conditions studied. The surfactant additives also had a negative influence on the compressive strength of the pastes, since there was a decrease in the index in the pastes that contained additive in their composition.

Keywords: alkali-activated cement. Binder. Fly ash. BOF steel slag. Workability. Setting time. Compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Modelo de geopolimerização proposto por Glukhosky, em 1959	22
Figura 2	– Esquema ilustrando o processo e os produtos de reação da ativação alcalina sob diferentes condições e em diferentes composições	24
Figura 3	– Fluxograma metodológico	35
Figura 4 a)	– Aspecto visual da cinza volante	36
Figura 4 b)	– Aspecto visual da escória de aciaria	36
Figura 5	– Equipamento utilizados	39
Figura 5 a)	– Máquina de abrasão Los Angeles	39
Figura 5 b)	– Moinho de bolas	39
Figura 6	– Argamassadeira planetária	41
Figura 7 a)	– Mini cone	42
Figura 7 b)	– Espalhamento de uma das pastas analisadas	42
Figura 8	– Aparelho de Vicat	43
Figura 9 a)	– Ilustração fôrma	44
Figura 9 b)	– Corpo de prova moldado na fôrma	44
Figura 10	– Ruptura de um dos corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão	45

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Diâmetro de escoamento (aditivo superplastificante x referência)	46
Gráfico 2 – Diâmetro de escoamento (aditivo plastificante x referência)	47
Gráfico 3 – Tempos de pega inicial e final do aditivo superplastificante	48
Gráfico 4 – Tempos de pega inicial e final do aditivo plastificante	49
Gráfico 5 – Resistência à compressão das pastas contendo aditivo superplastificante	50
Gráfico 6 – Resistência à compressão das pastas contendo do aditivo plastificante	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais estudos sobre o uso de aditivos em materiais álcali-ativados.....	31
Tabela 2 – Composição química dos precursores	37
Tabela 3 – Caracterização do hidróxido de sódio	37
Tabela 4 – Caracterização do silicato de sódio.....	38
Tabela 5 – Arranjo dos traços.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SNIC	Sindicato da Indústria do Cimento
BOF	Basic Oxygen Furnace
UFC	Universidade Federal do Ceará
CSP	Companhia Siderúrgica do Pecém
NBR	Norma Brasileira
MAA	Materiais Álcali-Ativados
CAA	Cimentos Álcali-Ativados
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
C-A-S-H	Silicoaluminato de Cálcio Hidratado
C.V	Cinza Volante
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
ADT 1	Aditivo superplastificante
ADT 2	Aditivo plastificante

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
Fck	Resistência característica do concreto à compressão
Mpa	Mega Pascal
SiO ₂	Silica
Na ₂ O	Óxido de sódio
H ₂ O	Água
Al ₂ O ₃	Alumina
NaOH	Hidróxido de sódio
Na ₂ SiO ₃	Silicato de sódio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO GERAL	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	<i>Cimentos álcali-ativados</i>	<i>17</i>
2.1.1	<i>Precursores</i>	<i>18</i>
2.1.2	<i>Ativadores</i>	<i>22</i>
2.2	Características dos materiais álcali-ativados.....	24
2.3	Uso de aditivos tensoativos em materiais álcali-ativados.....	27
3	MATÉRIAS E MÉTODOS	32
3.1	Materiais.....	33
3.1.1	<i>Precursores</i>	<i>33</i>
3.1.2	<i>Água.....</i>	<i>34</i>
3.1.3	<i>Ativadores</i>	<i>34</i>
3.1.4	<i>Aditivos tensoativos</i>	<i>35</i>
3.1.4.1	Aditivo Superplastificante (ADT 1)	35
3.1.4.2	Aditivo Plastificante (ADT 2)	35
3.2	Métodos de pesquisa.....	36
3.2.1	<i>Tratamento granulométrico das matérias primas</i>	<i>36</i>
3.2.2	<i>Preparação da solução de hidróxido de sódio</i>	<i>37</i>
3.2.3	<i>Preparação das pastas</i>	<i>37</i>
3.2.4	<i>Ensaio.....</i>	<i>39</i>
3.2.4.1	No estado fresco	39
3.2.4.1.1	<i>Mini abatimento (mini Slump).....</i>	<i>39</i>
3.2.4.1.2	<i>Tempo de Pega</i>	<i>40</i>
3.2.4.2	No estado endurecido	42
3.2.4.2.1	<i>Resistência à compressão.....</i>	<i>42</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1	<i>Ensaio no estado fresco</i>	<i>44</i>
4.2	<i>Ensaio no estado endurecido</i>	<i>48</i>
5	CONCLUSÃO	51
5.1	Sugestões de trabalhos futuros	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é o material aglomerante mais utilizado para produzir argamassas e concretos. De acordo com dados do Sindicato da Indústria do Cimento (SNIC, 2020) foram produzidas no Brasil 61 milhões de toneladas desse aglomerante no ano de 2020. Contudo, seu uso está associado à elevadas taxas de CO₂ liberadas ao longo da sua cadeia produtiva, além da extração de matéria-prima não renovável. Diante disso, tem-se avançado com estudos de materiais que visam a substituição parcial ou completa deste material. Dentre eles, os cimentos álcali-ativados são uma importante alternativa para mitigar os efeitos negativos da indústria do cimento. Por exemplo, o concreto produzido com cimento álcali-ativado reduz a emissão de CO₂ em aproximadamente 73% em relação ao concreto tradicional de cimento Portland (BORGES, 2014).

Os cimentos álcali-ativados utilizam materiais em pó ricos em aluminossilicato, denominados precursores, misturados a ativadores alcalinos, para formar uma matriz aglomerante, cujo produto principal da reação química (álcali-ativação) tem uma estrutura variável de amorfa a semicristalina (ZERZOURI *et al.*, 2021). Seu uso está associado a diversas vantagens, dentre as quais destacam-se a redução nas emissões de CO₂, o uso de subprodutos industriais, entre outras. Segundo Provis *et al.* (2014) existem análises de desempenho que demonstram o uso promissor destes materiais tanto em infraestrutura civil, quanto em outros setores da indústria da construção. Entretanto, a questão ambiental é imprescindível, e diante disso, a mais destacada.

Na produção de cimentos álcali-ativados são utilizados materiais residuais, como as escórias de alto forno e as cinzas volantes (ZHANG *et al.*; XIE *et al.*, 2020). Esses materiais têm recebido grande atenção da comunidade acadêmica nos últimos anos com o intuito de demonstrar cientificamente que suas propriedades apresentam resultados promissores na produção de concretos e argamassas, de modo a propiciar aplicações destes resíduos, valorizando-os como subprodutos industriais (LIVI; REPETTE, 2015; WIJAYA; EKAPUTRI; TRIWULAN, 2017; AZEVEDO *et al.*, 2017; PROVIS; VAN DEVENTER, 2019). As pastas, as argamassas ou mesmo os concretos álcali-ativados apresentam bom desempenho quanto à resistência mecânica, carbonatação, ataques químicos, altas temperaturas, além de baixa retração e permeabilidade. (LEE; VAN DEVENTER, 2002; DUXSON *et al.*, 2005; ZANGHI *et al.*, 2018).

Além das cinzas volantes, a escória de alto forno é um subproduto muito utilizado como material suplementar na composição do cimento Portland e como precursor de cimento álcali-ativado. No entanto, outros resíduos não usuais também podem ser empregados, como é o caso das escórias de aciaria BOF (Basic Oxygen Furnace) (NUNES; BORGES, 2021). Trata-se de um resíduo proveniente da etapa de refino em conversores de oxigênio (XUE *et al.*, 2006). Essa etapa faz parte do processo produtivo do aço, produto que é produzido em larga escala no Brasil. Apenas no ano de 2020 foram produzidas mais de 31,4 milhões de toneladas, sendo o estado do Ceará responsável por quase 3 milhões de toneladas do produto (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2020). Toda essa produção representa, conseqüentemente, uma enorme geração de resíduos, que em sua grande maioria não possuem destinação e são apenas armazenados sem possibilidade de serem reutilizados. De acordo com a Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP 2021), para cada tonelada de aço líquido processado pela companhia, são gerados de 100 a 150 quilos de escória de aciaria.

O trabalho de Costa (2022) utilizou a escória BOF da CSP em composição com a cinza volante e obteve pastas cimentícias com resistências à compressão factíveis para a preparação de compósitos. No entanto, o uso em compósitos como o concreto, além da resistência mecânica, requisitos de trabalhabilidade devem ser atendidos. Essa propriedade é facilmente adaptada no concreto de cimento Portland com uso de aditivos plastificantes. O estudo de Araujo (2022), utilizando os mesmos precursores, buscou verificar o comportamento de pastas para posterior uso em concretos álcali-ativados. Para isso o autor formulou diferentes traços, variando módulo de sílica, teor de álcalis, proporções dos precursores e condições de cura. Como resposta, ele obteve uma resistência à compressão que alcançou 80 Mpa em um de seus traços.

Entretanto, alguns bons resultados relacionados a resistência à compressão correspondiam a trabalhabilidade inadequada para aplicação no concreto. Como defendem Zhang *et al.* (2020), materiais álcali-ativados com elevada resistência correspondem em produtos com baixa trabalhabilidade. Nesse contexto, percebe-se a necessidade de avaliar a influência dos aditivos tensoativos na trabalhabilidade e resistência de pastas cimentícias álcali-ativadas à base de cinza volante e escória de aciaria BOF. Haja vista que a literatura possui diversas lacunas sobre o uso destes produtos, sobretudo quando usada a escória de aciaria BOF como precursor.

Portanto, neste trabalho, as análises necessárias serão pautadas pela normatização existente, de um modo comparativo, fazendo uso das normas referentes ao cimento Portland. Pois não há, seja no âmbito nacional ou internacional, normatização referente aos materiais

álcali-ativados. Os tempos de pega das pastas serão avaliados com base na ABNT NBR 16697 (2018). Serão realizados ensaios de mini Slump proposto por Kantro (1980) para determinar a consistência das pastas. E por fim, a resistência à compressão das pastas se pautará na ABNT NBR 13279 (2005).

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência do uso de aditivos tensoativos no estado fresco e na resistência mecânica de pastas álcali ativadas à base de cinza volante e escória de aciaria BOF produzidas na Região Metropolitana de Fortaleza.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Avaliar o efeito dos aditivos tensoativos em variadas proporções no tempo de pega e na trabalhabilidade das pastas cimentícias;
- b) Avaliar a influência dos aditivos tensoativos na resistência à compressão das pastas cimentícias;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cimentos álcali-ativados

Os cimentos álcali-ativados são originados da mistura em pó rico em aluminossilicato, denominado de precursor, e ativadores alcalino (PROVIS, 2018). Os precursores, em sua grande maioria, são subprodutos industriais, como as escórias siderúrgicas e cinzas do carvão mineral, também são utilizadas argilas calcinadas. A fonte alcalina, geralmente, são hidróxidos de sódio e silicatos de sódio, embora muitos outros também possam ser utilizados, desde que cumpram a função de elevar o pH da mistura (PERARDT, 2021).

Estes materiais tiveram seu uso difundido nos últimos anos em função do interesse da indústria cimenteira em reduzir suas elevadas emissões de CO₂ na atmosfera, assim como, ao empenho da comunidade científica para promover o avanço do conhecimento das propriedades desses materiais (PROVIS; PALOMO; SHI, 2015). Segundo Mohajerani *et al.* (2019), o uso de ligantes álcali-ativados pode reduzir em até 80% as emissões de CO₂.

No entanto, este material foi inicialmente proposto e difundido exponencialmente por Joseph Davidovits, pelas características de resistência a altas temperaturas que possuem. Além do mais, os benefícios associados ao seu uso vão muito além da redução de CO₂ ou sua elevada resistência à altas temperaturas. Pode-se citar como exemplo o aumento das resistências mecânicas, à abrasão, ao ataque químico, além de não estarem sujeitos à reação álcali-agregado (RAA) (DUXSON *et al.*, 2007a).

A álcali-ativação é uma reação química de hidratação de aluminossilicato com substâncias alcalinas ou alcalinas-terrosas. De acordo com Fernández-Jiménez, Palomo e Criado (2005) pode-se dividir o estudo da álcali-ativação em 2 modelos principais:

- Álcali-ativação das escórias granuladas de alto forno (modelo de sistema com alto teor de cálcio)
- Álcali-ativação de argilas e de cinza volante classe F (modelo de sistema com baixo teor de cálcio)

Por outro lado, Palomo, Grutzeck e Blanco (1999) definem essa reação como um processo químico que possibilita a transformação de estruturas vítreas, isto é, estruturas formadas por arranjos atômicos desordenados, que não possuem simetria ou ordenação de longo alcance, em um material compacto e cimentante. Os pesquisadores Vargas *et al.* (2007) afirmam que os tipos mais comuns de precursores utilizados para a álcali-ativação são de argilas calcinadas, cinzas volantes e escórias de alto forno. O que sugere uma possibilidade de

transformar o que hoje são resíduos industriais em subprodutos industriais, incorporando-os na fabricação de argamassas e concretos, como já ocorre com parte da cinza volante produzida no Complexo termelétrico do Pecém (VASCONCELOS, 2018).

2.1.1 Precursores

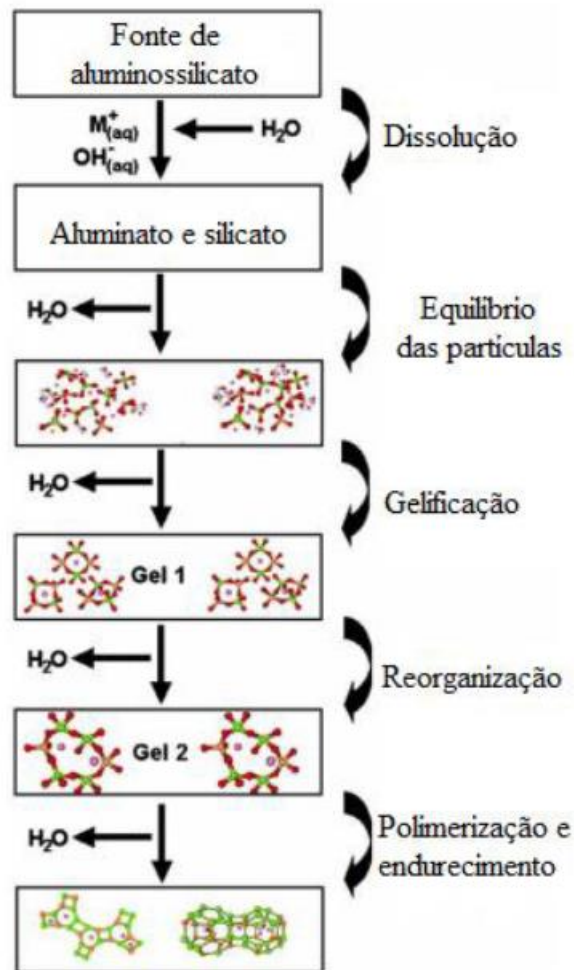
Provis e Van Deventer (2019) diferem em dois grupos os Materiais Álcali-Ativados (MAA)¹, em que são distintos pelo teor de cálcio do precursor, que pode ser de alto teor de cálcio ou de baixo teor de cálcio. Há ainda um terceiro grupo, defendido por alguns pesquisadores, entre eles Pacheco-Torgal *et al.* (2014), que é considerado como intermediário, uma vez que possui características comuns a ambos os grupos citados anteriormente.

O grupo com baixo teor de cálcio possui precursores compostos em sua grande maioria por alumínio e silício. Como estes materiais possuem baixo teor de CaO é necessário que estes sejam expostos a condições mais agressivas para que seja iniciada a reação, com meios altamente alcalinos e temperaturas de cura variando de 60 a 200 °C, resultando em um pH maior se comparado com precursores com alto teor de cálcio (PACHECO-TORGAL; GOMES; JALALI, 2007). A principal reação é a formação de um gel N-A-S-H de aluminossilicato alcalino, que possui estrutura tetraédrica altamente reticulada, mas sem uma ordem química de longo alcance (DAVIDOVITS, 1994; PROVIS; VAN DEVENTER, 2014). Alguns autores, como os citados anteriormente, definem este gel formado como geopolímero ou polímero inorgânico.

Segundo Yun-Ming *et al.* (2016), não há uma compreensão clara acerca da reação de geopolimerização até este momento. Entretanto, a maior parte dos pesquisadores que trabalham neste tema entendem como correto o modelo proposto por Glukhosvky, que divide o processo de reação em três etapas: dissolução-coagulação, coagulação-condensação e condensação-cristalização. Com os avanços nesta área de pesquisa esse modelo foi aprimorado e adaptado por Duxson (2006), passando a ter cinco etapas que são ilustradas na Figura 1 e são denominadas da seguinte forma: dissolução, equilíbrio das partículas, início da formação do gel, reorganização, e por último, polimerização e enrijecimento.

¹ Entende-se como Material Álcali-Ativado (MAA) compósitos como concretos, argamassas, grautes, entre outros, que utilizam o cimento álcali-ativado como matriz aglomerante(ligante).

Figura 1 - Modelo de geopolimerização proposto por Glukhosky, em 1959.



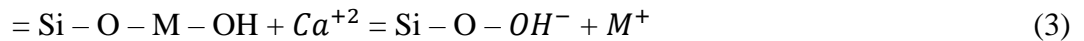
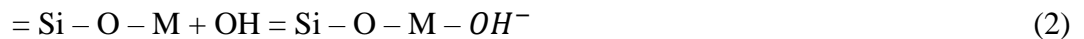
Fonte: Adaptado de Duxson et al. (2006)

Inicialmente, os componentes do precursor formados por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) são dissolvidos em soluções com $pH \geq 10$, passando a apresentar estruturas tetraédricas $[SiO_4]$ e $[AlO_4]^-$ solúveis e estabilizadas pelo metal (M^+) proveniente da base e pelas moléculas de água, resultando na gelificação (MASON, 1966). Em seguida, com o avanço da desidratação as espécies $[SiO_4]$ e $[AlO_4]^-$ se aproximam (reorganização) a ponto de formar as ligações O-Si-O-Al-O poliméricas que resultam nas formas bi- e tridimensionais do produto (SHARP *et al.*, 2010).

Na última etapa ocorrerá a formação de produtos que se assemelham às zeólitas, por meio da evaporação da água da solução. O endurecimento ocorrerá quando o produto formado estiver completamente condensado e apresentando uma porosidade distribuída e uniforme (DUXSON *et al.*, 2005).

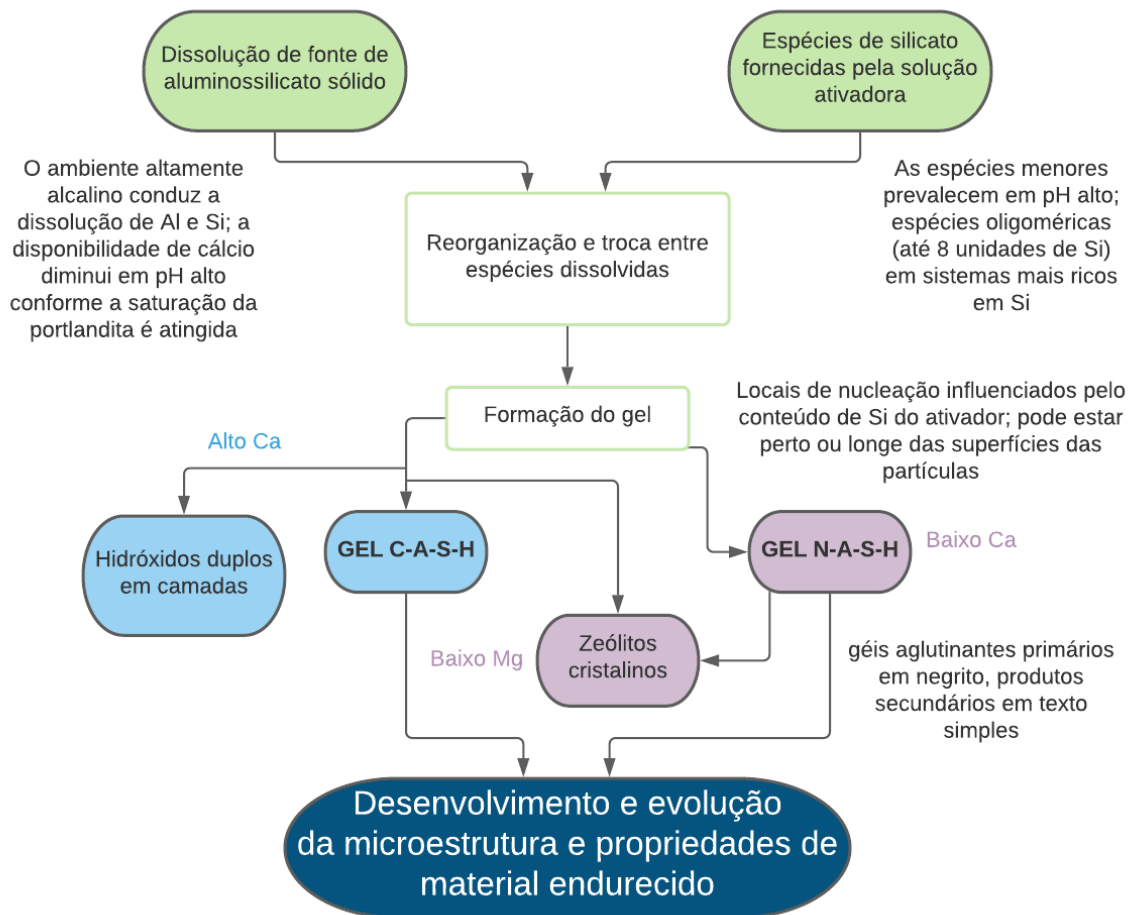
O grupo com alto teor de cálcio tem sua composição, na grande maioria, formada por cálcio e silício. Por esta razão, os precursores desse grupo são ativados em condições alcalinas mais moderadas do que o grupo citado anteriormente. O produto da reação será um gel C-A-S-H, que pode ser definido como um sílico-aluminato de cálcio hidratado, que se assemelha aos produtos obtidos na hidratação do cimento Portland (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014). Pode-se citar a escória de alto forno como um exemplo de precursor com alto teor de cálcio.

Nos precursores com teores de cálcio acima de 35%, em uma solução com índices baixos ou médios de alcalinidade, os produtos de reação formado são géis de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e silicoaluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H) (PROVIS; VAN DEVENTER, 2019). De acordo com os pesquisadores Pacheco-Torgal, Gomes e Jalali (2007), os produtos de C-S-H são encontrados geralmente com relação atômica cálcio/silício menor que 3, além dos mais variados graus de cristalinidade. Esses autores descreveram o modelo que foi desenvolvido por Glukhovsky (1994) para explicar as reações álcali-ativas entre materiais silicosos e alcalinos nas Equações 1, 2 e 3:



O ativador alcalino, nesse sistema, age como um catalisador nas fases iniciais de hidratação, e tudo isso ocorre por meio de uma troca catiônica com os íons Ca^{+2} do hidróxido de cálcio presente na reação, que após as reações é liberado. Durante a reação, o alumínio substitui átomos de silício com um arranjo tetraédrico, possibilitando a formação de C-(A)-S-H (MACIOSKI, 2017). Para Pelisser, Gleize e Mkowski (2009), a relação molar CaO/SiO_4 nessas reações variam de 0,9 a 1,2. Além disso, também poderão ser formados produtos secundários, que dependerão da composição do precursor utilizado, do tipo e concentração do ativador presente na solução, da alcalinidade e das condições de cura que ela for exposta (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2014). Na Figura 2 está a representação geral do processo e dos possíveis produtos de reação de álcali-ativação formados a partir das diferentes condições e composições.

Figura 2 - Esquema ilustrando o processo e os produtos de reação da ativação alcalina sob diferentes condições e em diferentes composições.



Fonte: Adaptado de Provis e Van Deventer (2019).

O fluxograma ilustra de forma resumida o processo, que parte de uma fonte de aluminossilicato advinda dos precursores somadas a espécies de silicatos presentes da solução ativadora. A reação desses materiais culmina numa reorganização química, combinada a uma troca entre as espécies envolvidas no processo de reação. A Figura 2 demonstra também algumas das possíveis condições que podem gerar produtos distintos, como por exemplo ambientes mais ou menos agressivos. Todo esse processo acaba por gerar géis, que dependem das condições iniciais e que são divididos em altos ou baixos teores de cálcio, além do produto intermediário com características comuns a ambos os grupos citados (PROVIS; VAN DEVENTER, 2019).

2.1.2 Ativadores

Os principais ativadores alcalinos utilizados para produção de cimentos álcali-ativados são os hidróxidos (principalmente de sódio) e os silicatos de sódio e potássio (PROVIS; BERNAL, 2014). Segundo Fuzioka (2021), o ativador usado na mistura, seja na forma pura ou uma combinação de dois ou mais ativadores, influenciará diretamente nas propriedades do produto final. Criado, Palomo e Fernandes-Jimenez (2005) defendem o uso de forma combinada, misturando hidróxidos (sólidos com dissolução em água) e silicatos (em estado líquido ou sólido dissolvidos em água).

De acordo com Lima *et al.* (2005), a função do hidróxido de sódio é garantir a alta alcalinidade da solução, enquanto que, atribui ao silicato uma fonte adicional de SiO_2 . Além do mais, é função do hidróxido de sódio dissolver as matérias-primas e cabe ao silicato a função de ligante na reação (PINTO, 2004).

Segundo Provis (2014), a concentração molar do ativador deve variar de acordo com o precursor que será utilizado. Quando o precursor for do grupo com baixo teor de cálcio, é indicado concentrações mais altas, variando de 10 a 14 molares. Já quando o precursor estiver presente no grupo com alto teor de cálcio, será mais reativo em concentrações mais baixas, variando de 6 a 8 molares. E é necessário que os valores de pH sejam superiores a 13 para a ativação de aluminossilicatos (KHALE; CHAUDHARY, 2007).

O hidróxido de sódio é o ativador mais utilizado, visto que se trata de um produto com menor custo e maior disponibilidade de mercado. Contudo, de acordo com Provis (2009), esse é um material com natureza altamente corrosiva, o que requer o uso de equipamentos apropriados para seu uso em larga escala. Ainda de acordo com o autor citado, este material tem como propriedades mais relevantes: a baixa viscosidade e o calor de dissolução. Segundo Livi (2013), esse ativador trata-se de um material sólido, com uma coloração branca e que é obtido por meio de eletrólise, processo definido como uma mudança química provocada pela aplicação de energia elétrica.

De acordo com Foletto *et al.* (2006), o silicato é produzido por meio da calcinação de um carbonato com uma fonte de sílica expostos a uma temperatura que varia de 1400 a 1500 °C. Os silicatos de sódio e potássio são os mais usuais no processo de álcali ativação, sendo o primeiro o silicato solúvel mais popular, pois é produzido com maior facilidade e conta com um preço inferior em comparação com os demais. Para Longhi (2015), esse material é uma combinação de SiO_2 , Na_2O e H_2O , podendo ser considerado um material altamente solúvel em água quando for originalmente sólido.

Iler (1979) afirma que os silicatos de sódio possuem uma razão de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, intitulado módulo de sílica, variando entre 1,6 e 3,75 (podendo variar de acordo com as necessidades do usuário). Todavia, existe a possibilidade de produção de silicatos com módulo de sílica superiores a 4. Esses materiais são comercializados na forma de sólidos parcialmente hidratados ou mesmo em soluções aquosas. De acordo com Weldes e Lange (1969), o módulo de sílica e a viscosidade são grandezas diretamente proporcionais, à medida que uma cresce a outra também seguirá o mesmo caminho. Desse modo, temos a viscosidade como um limitador para a concentração de sódio em uma solução, uma vez que à medida que temos um aumento da concentração deste na solução, tem-se, por conseguinte, um aumento da viscosidade até que a solução se torne um sólido.

Baseado no estudo proposto por Lloyd *et al.* (2009), Longhi (2015) exemplificou o modelo de dissolução e formação da fase hidratada, comparando os silicatos e hidróxidos usados. Segundo o autor, o hidróxido quando utilizado na ativação necessita de um período intermediário para que as partículas iniciem a dissolução, para que então ocorram as ligações. Em contrapartida, quando utilizado o silicato o aumento de resistência ocorreu mais rapidamente. Isso porque a sílica presente no estado dissolvido já possui algumas moléculas de silício prontas para sejam realizadas as ligações.

Provis e Van Deventer (2014) defendem o uso do silicato de sódio como uma solução incorporada à mistura, visto que quando é usado como um sólido tem-se como resultado uma resistência inicial mais baixa e que pode sofrer variações, o que torna moroso o processo de álcali-ativação. Assim como defendem esses autores, para Duxson (2007), o silicato de sódio é preferível em detrimento do hidróxido de sódio para uso em precursores com baixo teor de cálcio.

Isso ocorre pois o alumínio presente nos precursores é dissolvido na solução e tem uma facilidade maior de reação com qualquer silicato fornecido pelos ativadores alcalinos. Deste modo, a presença de silicato de sódio na solução possibilita uma porção maior de benefícios em detrimento do hidróxido, visto que o silicato proporciona melhorias no processo de álcali-ativação, contribuindo para a formação de produtos com melhores propriedades mecânicas e mais compactas, como sugeriram os autores citados anteriormente.

2.2 Características dos materiais álcali-ativados

Os materiais álcali-ativados apresentam diversos benefícios ligados ao seu uso. De modo geral, as suas características o colocam como possível substituto do cimento Portland. Pode-se citar, por exemplo, suas qualidades de resistências à ambientes agressivos, que indicam uma durabilidade igual ou até superior aos materiais convencionais (FERNANDEZ-JIMENEZ; GARCÍA-LODEIRO; PALOMO, 2007).

Também é possível citar a boa resistência à abrasão, proteção inerente da armadura de aço devido ao alto pH residual e baixas taxas de difusão de cloreto, baixa retração e baixa condutividade térmica, não está sujeito a reações deletérias álcali-agregado, alto nível de resistência a uma gama de diferentes ácidos e soluções salinas, resistência ao fogo e nenhuma emissão de vapores tóxicos quando aquecido (DUXSON *et al.*, 2007a).

Tudo isso, conduz esse material a apresentar-se como uma importante alternativa ao cimento Portland. No entanto, é fundamental salientar que há uma incerteza se todas essas características possam ser obtidas em apenas uma única formulação, sendo necessário que se busque formular as misturas de acordo com as propriedades que se almejam alcançar (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

Algumas das propriedades mais importantes buscadas em concretos convencionais são relacionados à resistência mecânica e à durabilidade, tanto para o projeto que este fora solicitado como para as condições do ambiente ao qual será exposto. O mesmo se aplica aos materiais álcali-ativados, uma vez que o grande objetivo das pesquisas referentes a este é inseri-lo na construção civil. Para isso é necessário que estes possuam propriedades semelhantes ou até melhores, de modo que seja vantajosa esta inserção.

Os estudos realizados até o momento indicam resultados promissores. Entretanto, há um leque enorme de lacunas que precisam ser preenchidas. De acordo com Zhang *et al.* (2018), estes materiais podem suprir as necessidades referentes a resistência à compressão.

Existem vários fatores que contribuem nas propriedades mecânicas de um material. Alguns pesquisadores defendem que a razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ influencia diretamente nas propriedades mecânicas e microestruturais de geopolímeros à base de metacaulim (FLETCHER *et al.*; DUXSON *et al.*, 2005; DE SILVA; SUGOE-CRENSTIL, 2008; JUENGSUWATTNANON *et al.*, 2019). A maior parte desses estudos relatam que uma relação de $\text{Si}_2/\text{Al}_1\text{O}_3$ entre 3 e 5 apresentam melhores resultados com relação a resistência à compressão. Os resultados que foram obtidos fora desse intervalo mostraram-se inferiores.

Davidovits (1982) sugeriu que a relação ideal para o desenvolvimento de geopolímeros estivesse entre 3.5 e 4.5. Além do mais, sugeriu que fosse adotada uma relação de $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ entre 0,8 e 1,2. Outro fator que é válido ser mencionado aqui é a relação $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, onde tem-se como sugestão da literatura uma adoção entre 10-15 para termos a fase geopolimérica amorfa e uma maior resistência à compressão (STEVESON; SAGOE-CRENTSIL, 2005; DE SILVA; SAGOE-CRENTSIL, 2008; JUENGSUWATTNANON *et al.*, 2019).

Esses resultados são direcionados a geopolímeros à base de metacaulim. Por isso é importante salientar que uma mudança de precursor acarreta em diferenças também nessas relações, visto que cada precursor possui propriedades peculiares que provocam essa mudança. No caso do metacaulim, estes são caracterizados por sua enorme capacidade de dissolução em solução alcalina, o que resulta em um produto final com razões molares idênticas as do precursor inicial.

Segundo Khale e Chaudhary (2007) o mesmo não se pode dizer quando se faz o uso de subprodutos, como as cinzas volantes, como precursores na reação. Além do mais, este tipo de subproduto é considerado diversificado, o que contribui consideravelmente no processo de geopolimerização em comparação ao metacaulim (LLOYD; PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

Diante disso, Dehghani, Aslani e Ghaebi (2021) se propuseram em avaliar os efeitos da razão molar inicial de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ em geopolímeros à base de cinza volante curados em temperatura ambiente. Os autores chegaram à conclusão que o aumento da relação de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ possibilita uma redução nos tempos de pega inicial e final, além de uma diminuição na fluidez de cada sistema analisado. A resistência máxima à compressão foi obtida com uma relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 3,37 ($\text{Si}/\text{Al} = 1,68$). Outro ponto avaliado foi o efeito da substituição de cinza volante por escória granulada de alto forno. Os resultados mostraram que com o aumento dessa substituição obtiveram tempos de pega acelerados e diminuição de fluidez, além de melhoria significativa na resistência à compressão, sobretudo em idades superiores.

No estado fresco, a principal propriedade de pastas e argamassas é a trabalhabilidade, que é uma propriedade de grande variação. Segundo Simões *et al.* (2012) esta pode ser modificada de acordo com a proporção de água adotada na mistura, além de sofrer alterações por meio da relação líquido/sólido. Já Silva (2015) cita a densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água como propriedades essenciais para obter uma boa trabalhabilidade. Outro ponto importante é que reduções no módulo de sílica representam um aumento da plasticidade de argamassas (ANDERSON; GRAM, 1998)

Pinto (2006) defende que neste estado os geopolímeros apresentam ótimas propriedades, dentre as quais podemos citar: boas trabalhabilidade e coesão, além de um acabamento superficial que contribui para um rápido ganho de resistência mecânica e dureza. Todavia, alguns estudos demonstram que as propriedades da argamassa geopolimérica podem sofrer mudanças a partir de pequenas alterações na relação sílica/alumina, como destaca o autor (VASSALO, 2013).

Argamassas com silicato de sódio possuem uma trabalhabilidade muito boa se comparada a argamassas à base de cimento Portland (ANDERSON; GRAM, 1986). Por outro lado, segundo defendem Talling e Brandstetr (1989), essa característica se torna nula, pois após o início das reações com as escórias há uma rápida redução do efeito plastificante, fazendo-se necessário o uso de retardadores para usos correntes. Provis (2014) alerta que quando se trabalha com soluções concentradas de silicato alcalino com altas concentrações de sílica, é provável que sejam encontradas algumas barreiras na viscosidade com relação a trabalhabilidade destas misturas no estado fresco. Conforme Talling e Brandstetr (1989), a relação água/precursor acima de 0,6 poderiam ser utilizadas como retardadores, mas é algo que influencia diretamente na resistência mecânica destes produtos, sobretudo nas primeiras idades.

Zhang (2018) afirma que o tempo de pega é importante uma vez que ele determina o tempo limite do processo de produção e aplicação de argamassas. Neste processo tem-se as etapas de transporte, aplicação e compactação da argamassa. Ainda de acordo com autor a forma mais fácil para mensurar esta propriedade é por meio do aparelho de Vicat. Essa é a forma adotada no Brasil para medir o tempo de pega inicial e final de argamassas à base de cimento Portland, normatizada pela ABNT NBR 16607 (2018), e a mesma que será usada como parâmetro para avaliar as misturas álcali-ativadas deste trabalho.

Zhang (2018) afirma que para as argamassas geopoliméricas à base de cinza volante as relações $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ e solução alcalina/cinza volante interferem muito pouco nos tempos de pega. Apesar disso, o autor defende que um aumento da molaridade do NaOH pode representar uma diminuição notável dos tempos de pega inicial e final. Os mesmos autores defendem que existem alguns fatores que influenciam no tempo de pega de pastas álcali-ativadas. Essa ideia é defendida também por outros autores, como é o caso do estudo proposto por Leonard Wijaya, Jaya Ekaputri e Triwulan (2017) que citam a presença de CaO nas cinzas volantes como um fator que influencia diretamente no tempo de pega de pastas à base deste material.

Além desses fatores, parâmetros relacionados aos ativadores como concentração molar do hidróxido de sódio e a solução de silicato alcalino. Também interferem aspectos físicos e químicos dos precursores, como a finura das partículas e os teores de alumina e sílica.

2.3 Uso de aditivos tensoativos em materiais álcali-ativados

De acordo com a ABNT 11768-1 (2019), os aditivos podem ser definidos como um produto que é adicionado ao concreto, geralmente não ultrapassando 5% da composição total do aglomerante, que usualmente é o cimento Portland. Os aditivos são responsáveis por facilitar a produção e a aplicação do concreto, permitindo a preparação do concreto em variadas temperaturas e contribuindo para redução dos custos. A inserção deste produto à mistura culmina em alterações nas propriedades reológicas, influenciando nos tempos de pega e em várias outras propriedades. Estas alterações possibilitam o desenvolvimento de concretos autoadensáveis e concretos de alto desempenho, com trabalhabilidade e resistência superiores às convencionais (BARON; AITICIN, 1996).

Dentre os aditivos presentes no mercado, os redutores de água são uma das categoriais mais importantes, sendo classificados pela norma brasileira em: plastificantes e superplastificantes. A norma classifica-os por meio do seu nível de redução de água. Entretanto, nos últimos anos surgiram dois novos aditivos redutores de água: os fluidificantes, com níveis de redução de água de até 40% e os polifuncionais que se assemelham as superplastificantes, mas que permitem um maior período de tempo com a trabalhabilidade preservada (CORRÊA, 2010).

Os aditivos plastificantes são capazes de reduções mínimas de 6% dos níveis de água ou ainda são capazes de aumentar o índice de consistência de um concreto, sem aumentar o consumo de água, além de compartilhar com outros aditivos redutores de água uma melhoria da coesão, homogeneidade e diminuição da retração.

Neville (2016) define usualmente os superplastificantes como polímeros inorgânicos solúveis em água e que são sintetizados por meio de um processo complexo de polimerização. Este processo é capaz de produzir longas moléculas com elevada massa molecular. Sua produção complexa faz com que o seu custo final seja elevado, tornando este um produto relativamente caro. Geralmente, são divididos em algumas categorias, sendo mais usuais em concretos convencionais, os produzidos à base de melanina e naftaleno. Todavia, algumas alternativas têm sido desenvolvidas pela indústria, como é o caso da nova categoria de polímeros policarboxilatos.

O uso desses produtos tem sido amplamente difundido em concretos convencionais (HANEHARA; YAMADA, 1999; CHANDRA; BJORNSTROM, 2002). Por outro lado, a sua aplicação em materiais alternativos, como os álcali-ativados, tem sido objeto de investigação da comunidade acadêmica, dado que esse tipo de material está em pleno desenvolvimento. Na Tabela 1 são listados os principais trabalhos sobre o uso de aditivos plastificantes e superplastificantes em materiais álcali-ativados.

Tabela 1 – Principais estudos sobre o uso de aditivos em materiais álcali-ativados

Autores	Material	Precursor	Ativadores	Relação ativador/precursor ou água/precursor	Tipo de aditivo	Dosagem
Bakharev, Sanjayan e Cheng (2000)	Concreto	Escória de alto forno	Solução de NaOH + carbonato de sódio, silicato de sódio	1:2	Naftaleno, agente incorporador de ar, redutores de água e redutores de encolhimento	6%
Puertas <i>et al.</i> (2003)	Pastas e argamassa	Escória de alto forno e CV classe F	NaOH + silicato de sódio e NaOH 8M	0.5	Copolímeros de vinil e poliácrlate	2%
Palacios e Puertas (2005)	Pastas e argamassa	Escória de alto forno	NaOH e silicato de sódio	2:1	Policarboxilatos, copolímeros de vinil, à base de melamina e naftaleno	1%
Fernandes <i>et al.</i> (2017)	Argamassa	Metacaulim e sílica da casca de arroz	NaOH 97% puro	-	Naftaleno	1%
Muhammad <i>et al.</i> (2018)	Pastas	Cinza volante	NaOH e silicato de sódio	17: 3	Policarboxilato	0.5, 1 ou 1.5 %
Lee <i>et al.</i> (2020)	Pastas e argamassa	Metacaulim	Hidróxidos de sódio e potássio	-	Policarboxilatos	-

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

O estudo produzido por Fernandes *et al.* (2017) buscou avaliar o uso de aditivos superplastificantes à base de naftaleno na trabalhabilidade das argamassas à base de metacaulim e cinza da casca de arroz. Na argamassa em que se utilizou areia natural, o espalhamento correspondeu a 236 mm. Com a inserção de aditivo houve uma diminuição desse espalhamento, mais precisamente de 40% e 36%, para 0,5% e 1% de aditivo sobre a massa total de material sólido, respectivamente.

O efeito negativo também foi verificado na resistência mecânica, reduzindo a resistência à compressão em 88% e 91% com adição de 0,5% e 1% de aditivo, respectivamente. No mesmo estudo, utilizando areia de porcelana, os resultados mostram que houve um aumento

do espalhamento, no entanto, não se traduz em melhorias significativas nos resultados de consistência, enquanto, na resistência à compressão também reduções nos valores.

No estudo realizado por Lee *et al.* (2020), usando superplastificantes à base de policarboxilato e de metil isobutil carbinol (MIBC) em pastas à base de metacaulim, registrou um diâmetro de espalhamento da pasta de referência em 159 mm, quando adicionado superplastificante à base de policarboxilato houve uma diminuição gradativa desse diâmetro chegando a reduzir até 15%. Por outro lado, quando usado o superplastificantes à base de MIBC houve um aumento desse diâmetro, sobretudo quando utilizado 0,5% do aditivo sobre a massa do aglomerante. Embora ainda seja possível observar que à medida que aumenta a proporção do aditivo na mistura, há uma diminuição do diâmetro de espalhamento. O aditivo à base de MIBC também mostrou resultados positivos com relação a resistência à compressão. A pasta de referência do estudo obteve um fck de 68 Mpa, enquanto que a pasta em que foi inserida 0,5% desse aditivo sobre a massa do metacaulim obteve um fck de 83 MPa, o que representa uma melhoria de 22%.

Um estudo realizado por Puertas *et al.* (2003) analisou a influência do uso da última geração de superplastificantes, o primeiro à base de copolímeros de vinil, e o segundo, poliacrilato. Os autores tinham como objetivo avaliar as propriedades, sobretudo mecânicas, de pastas e argamassas produzidas a partir de cimentos alcalinos ativados obtidos a partir de escória de alto forno e cinza volante classe F. Os aditivos foram usados na proporção de 2% sobre a massa do aglomerante. A mistura de referência de escória de alto forno forneceu uma resistência mecânica de 70 Mpa, com a inserção do primeiro aditivo houve uma redução de 36% desse parâmetro. Quando usado o segundo aditivo, não foi observada uma mudança significativa. Por outro lado, na mistura de cinza volante classe F observou-se que esse efeito é menos acentuado, independente do aditivo utilizado. Além do mais, não foi possível observar uma mudança significativa na fluidez dessas pastas, invalidando sua utilização. De modo geral, o estudo indica que o uso de alguns superplastificantes não obterão resultados positivos em escória. Em contrapartida, demonstra que nas cinzas volantes os efeitos negativos são sentidos com muito menos intensidade, tornando possível seu uso.

Palacios e Puertas (2004) buscaram avaliar o efeito dos superplastificantes em pastas e argamassas de escória ativadas por álcali. De acordo com os autores, as resistências mecânicas foram maiores nas misturas ativadas com silicato de sódio em detrimento das ativadas por hidróxido de sódio. Para eles, os efeitos pela presença de aditivos nas propriedades mecânicas variam de acordo com o tipo de ligante e também do aditivo utilizado, além da natureza do ativador alcalino. Neste estudo, todos os aditivos usados na mistura ativada por

silicato de sódio reduziram a relação líquido / sólido, o que contribuiu para um aumento da resistência, se comparado as argamassas sem aditivos. Quando se fala da mistura ativada por NaOH, a mistura à base de naftaleno tem um efeito distinto das misturas com outros aditivos, visto que, tem uma redução maior da relação líquido / sólido. Outro resultado importante relacionado à fluidez das pastas, de acordo com esse estudo, com exceção do naftaleno, todos os outros superplastificantes utilizados não afetam a fluidez das pastas de escória ativada. Por fim, tem-se alterações também com relação aos tempos de pega dessas argamassas. Quando a escória é ativada por NaOH e o superplastificantes à base naftaleno é usado, tem-se um retardamento do endurecimento inicial em 2h e um endurecimento final em até 4h, quando a dosagem de Na_2O é de 4%.

Bakharev, Sanjayan e Cheng (2000) realizaram estudos no concreto, no qual buscou-se buscar variar a proporção do ativador na mistura. Quando usado o silicato de sódio, variando a proporção de 4% para 7% sobre a massa da escória, obtiveram um resultado de resistência à compressão aos 28 dias de 40 Mpa e 58 Mpa, respectivamente. Após a inserção do aditivo o valor inicial subiu para 46 Mpa, representando uma melhora significativa do parâmetro. Por outro lado, quando usado o superplastificante houve uma redução de 25% na resistência à compressão. Além desses resultados, os autores identificaram que em uma mistura de concreto à base de escória ativada por silicato de sódio (4% Na), com a adição de superplastificantes à base de naftaleno apresentou grande fluidez nos primeiros minutos, no entanto, após um período de 10 minutos, o concreto perdeu totalmente a fluidez, sugerindo que o aditivo funcionou como acelerador de pega.

Como mostra o estudo realizado por Shin Hau Bong e Ali Nazari (2019), que avaliou a eficiência de diferentes superplastificantes nas propriedades de misturas à base de cinza volante classe F e escória de alto-forno. Nesse estudo, os autores testaram a influência de cinco superplastificantes distintos, três à base de policarboxilato e dois à base de naftaleno. De modo geral, os aditivos mostraram grande influência no diâmetro de espalhamento, visto que a mistura sem a presença de aditivo apresentou 114 mm, enquanto que, após a inserção dos mesmos houve aumento de até 40% desse diâmetro. Os aditivos à base de naftaleno obtiveram os melhores resultados, contudo, o pico de aumento foi obtido quando usado um dos aditivos à base de policarboxilato. A resistência à compressão também foi afetada com o uso de aditivos, tendo uma leve redução do parâmetro na maioria dos casos. Além do mais, as pastas com presença de aditivo resultaram em tempos de pega inicial e final maiores que o da pasta de referência. Ainda de acordo com os autores, o aditivo mais recomendado para a composição

usada é o à base de policarboxilato, por representar um aumento do diâmetro de espalhamento e não representar uma diminuição da resistência à compressão da mistura.

De modo geral, é possível verificar que não há consenso na literatura sobre o efeito dos aditivos plastificantes e superplastificantes sobre as propriedades no estado fresco e no estado endurecido de materiais álcali-ativados. Existem vários fatores que influenciam nos resultados, como componentes químicos dos aditivos, tipo de ativador e tipo de precursores. Como exemplo, os aditivos superplastificantes possuem resultados satisfatórios em estudos realizados sobre a aplicação desses na melhoria da fluidez de precursores alcalinos ativados com o alto teor de cálcio (PALACIOS; PUERTAS, 2003; MUHAMMAD *et al.*, 2018). Por outro lado, os estudos relacionados ao uso em precursores alcalinos ativados com baixo teor de cálcio ainda possuem resultados limitados, e que não mostram resultados satisfatórios do ponto de vista econômico.

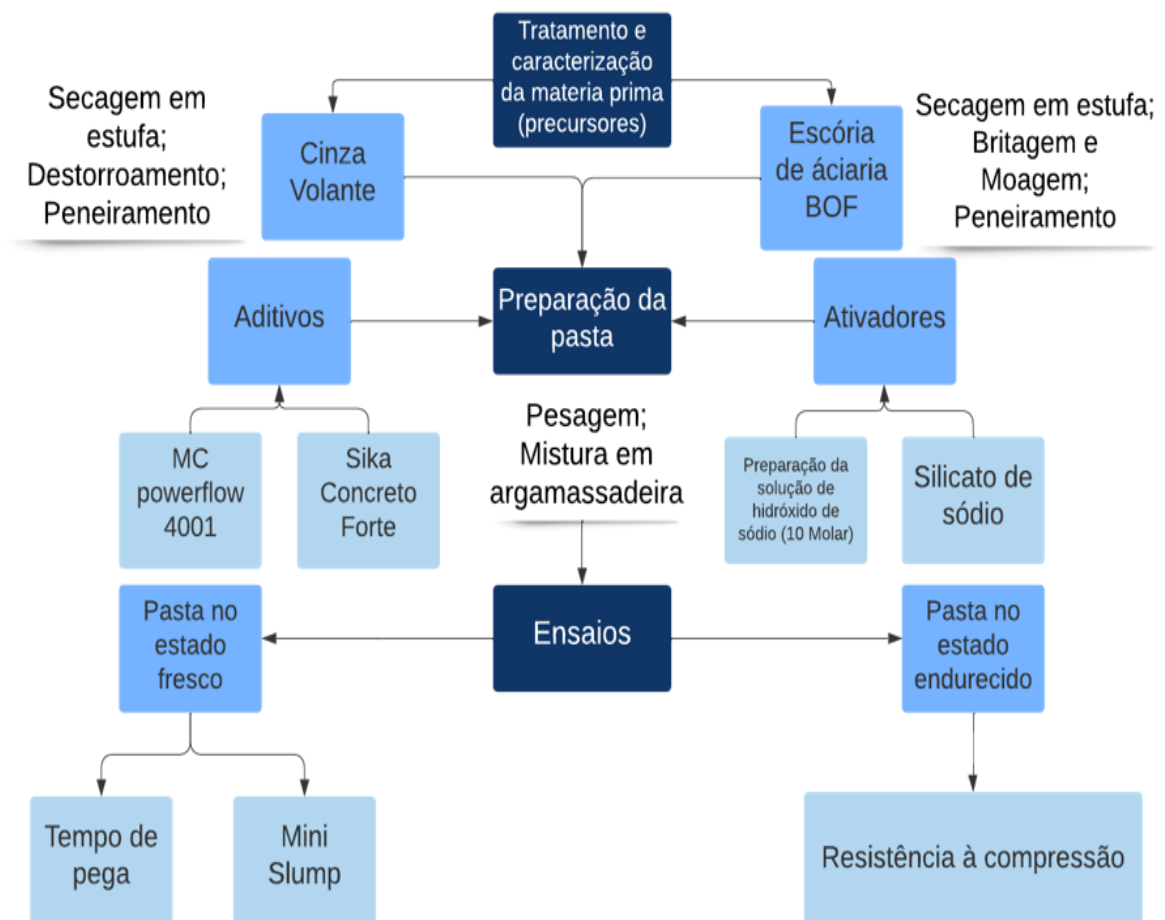
Por fim, vale salientar que a problemática encontrada no uso de aditivos em cimentos álcali-ativados ocorre devido à natureza do aditivo afetar diretamente o processo de ativação e o desenvolvimento da resistência do produto. Contudo, isso depende do tipo de precursor, por exemplo, essa barreira encontrada para melhorar a trabalhabilidade de geopolímeros é menos acentuada quando utilizada a cinza volante, tornando possível seu uso sem um aumento considerável do custo de produção de argamassas e concretos (PUERTAS *et al.*, 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa é enquadrada como pesquisa explicativa, quantitativa e experimental (THESAURUS, 2016).

Os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) e no Laboratório de Ligantes Asfálticos, ambos localizados na Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici. O fluxograma da Figura 3 ilustra de forma resumida o sequenciamento das atividades realizadas, sendo elas: tratamento e caracterização da matéria-prima, preparação de solução, preparação das pastas álcali-ativadas e ensaios no estado fresco e no endurecido.

Figura 3 - Fluxograma metodológico



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

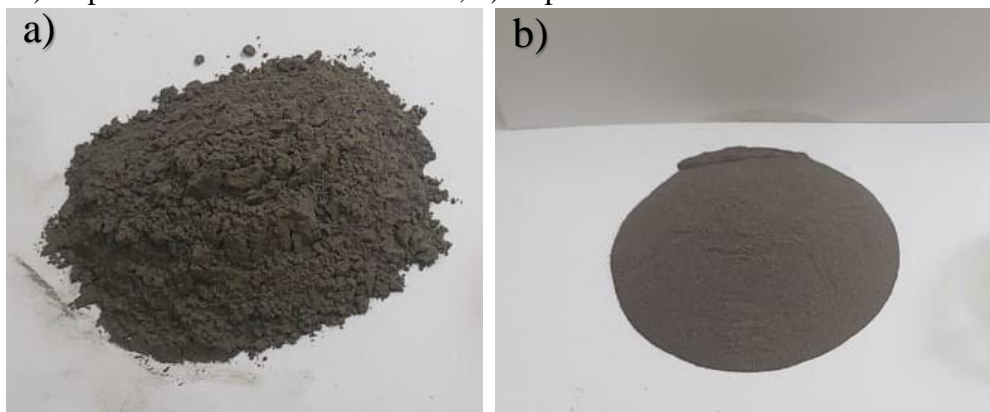
3.1 Materiais

Os materiais utilizados neste estudo foram: cinza volante classe F, escória de aciaria BOF, hidróxido de sódio - NaOH e silicato de sódio – Na₂SiO₃, água e aditivos tensoativos de duas categorias diferentes.

3.1.1 Precursores

A cinza volante foi o precursor fornecido pela Usina Termelétrica Energia Pecém, localizada no complexo industrial e portuário do Pecém. A usina é situada no município de São Gonçalo do Amarante, na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), distante cerca de 50 km da cidade de Fortaleza - Ceará. A cinza foi coletada com o auxílio do sistema de transporte da Universidade Federal do Ceará. A escória de aciaria BOF também foi utilizada como precursor, trata-se de um resíduo siderúrgico produzido pela Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP). A empresa também fica localizada no complexo do Pecém. Nas Figuras 4 a) e 4 b) estão ilustrados os aspectos visuais dos precursores utilizados.

Figura 4 – a) Aspecto visual da cinza volante; b) Aspecto visual escória de aciaria



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Os precursores foram caracterizados por meio da determinação da massa específica, superfície específica e composição química. A massa específica foi calculada tendo como base os parâmetros da ABNT NBR 16605 (2017). A cinza volante obteve massa específica de 2,34 g/cm³ e a escória de aciaria BOF foi sendo mensurada em 3,13 g/cm³ (ARAÚJO *et al.*, 2022).

A superfície específica foi calculada por meio do método Blaine, de modo comparativo com uma amostra de cimento de referência. A superfície específica da cinza

volante usada nesse estudo foi de 4790 cm²/g. Para a escória de aciaria BOF, o resultado obtido foi de 3360 cm²/g. O ensaio foi realizado na fábrica de cimento Apodi.

A composição química de ambos os precursores foi caracterizada por meio de uma análise de fluorescência de raio-X (FRX) realizada no laboratório de Raio-X do departamento de física da Universidade Federal do Ceará no equipamento *Rigaku ZSX Mini II*. Os resultados estão representados na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química dos precursores

Classificação da amostra:	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	ZnO	SrO
Cinza volante Termelétrica % Massa	11,14	42,2	0,53	1,08	0,06	3,97	10,3	2,74	0,27	26,98	0,15	0,67
Escória de aciaria BOF % Massa	1,94	5,64	0,84	0,83	0,04	0,14	53,1	-	2,97	34,40	0,06	-

Fonte: Araújo (2022); Targino *et al.* (2022).

3.1.2 Água

A água utilizada para a produção da solução de hidróxido de sódio foi proveniente da rede de água pública, submetida ao processo de destilação no laboratório de ligantes asfálticos da Universidade Federal do Ceará.

3.1.3 Ativadores

Os ativadores utilizados foram o hidróxido de sódio e silicato de sódio, comercializados pela empresa Gota Química. O hidróxido de sódio usado estava no estado sólido, com uma concentração de 97,9 %. A solução foi produzida com concentração molar de 10 mols/litro, sua caracterização é detalhada na Tabela 3.

Tabela 3 – Caracterização do hidróxido de sódio em volume.

Parâmetros	10 mols/litro
Sólidos totais - NaOH (%)	31,30
H ₂ O (%)	68,70
Relação H ₂ O/ NaOH	2,19
Densidade específica (g/cm ³)	1,305

Fonte: Araújo (2022); Targino *et al.* (2022).

O silicato alcalino foi utilizado na forma de solução e sua caracterização está representada na Tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização do silicato de sódio

Parâmetros	Resultados
Na ₂ O (%)	14,38
SiO ₂ (%)	31,83
Sólidos totais (%)	46,21
Reação SiO ₂ /Na ₂ O (módulo de sílica)	2,21
Densidade específica (g/cm ³)	1,583

Fonte: Araújo (2022); Targino *et al.* (2022).

3.1.4 Aditivos tensoativos

Os aditivos tensoativos testados foram o aditivo superplastificante (MC Powerflow 4001) e o aditivo plastificante (Sika Concreto Forte), conforme as características expostas a seguir.

3.1.4.1 Aditivo Superplastificante (ADT 1)

O aditivo MC powerflow 4001 é um aditivo superplastificantes sintético de alto desempenho baseado na tecnologia de polímeros policarboxilatos, produzido pela MC-Bauchemie. Esse produto possui uma densidade de 1,12 kg/L e uma dosagem indicada entre 0,2 a 0,5% sobre o peso do aglomerante.

3.1.4.2 Aditivo Plastificante (ADT 2)

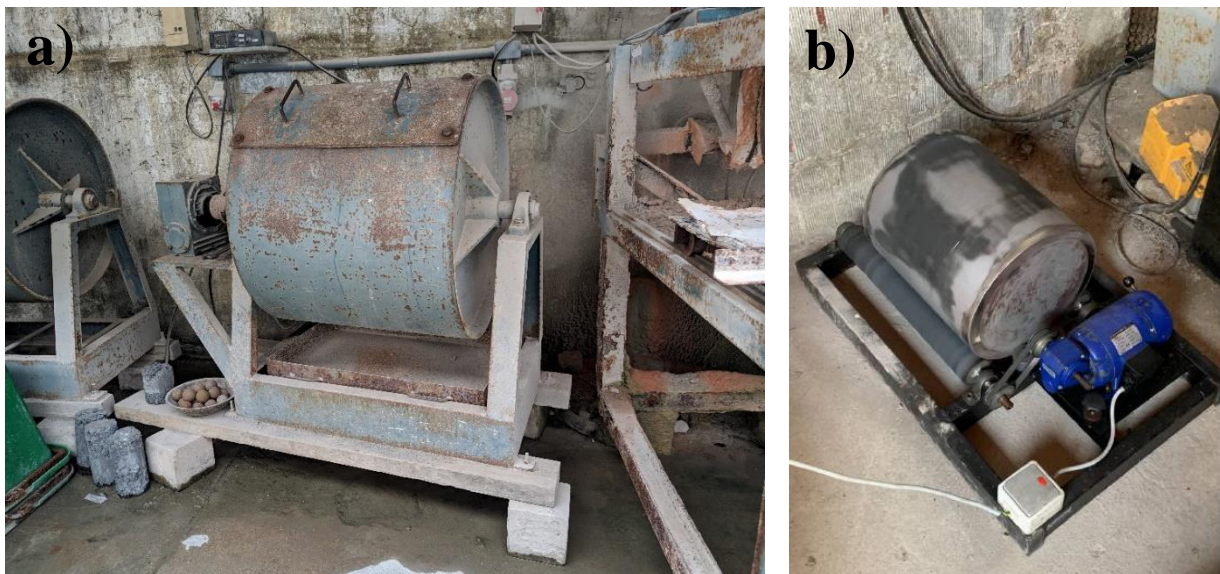
O aditivo Sika Concreto Forte é um aditivo plastificante baseado em sais sulfonados e carboidratos em meio aquoso, principalmente lignosulfonatos. É produzido pela Sika Brasil, e possui uma densidade de $1,06 \pm 0,02$ kg/L, é isento de cloretos e possui um pH que varia de 6 a 7, além de um teor de sólidos de $9,5 \pm 1,0$ %. A dosagem indicada é de 1 litro para cada 50kg do cimento, correspondendo a aproximadamente 2 % sobre a massa do aglomerante.

3.2 Métodos de pesquisa

3.2.1 Tratamento granulométrico das matérias primas

Os precursores precisaram passar por um tratamento prévio para adequação da granulometria. A escória de aciaria passou 24 horas em estufa com temperatura de 100 °C e após a secagem foi inserida no equipamento de abrasão Los Angeles, para fragmentação. Em seguida foi realizada a moagem em moinho de bolas por 03 horas, pois a quantidade de material passante na peneira N°100 (150 µm) era muito pequeno. As Figuras 5a e 5b ilustram os equipamentos citados, respectivamente.

Figura 5 – Equipamento utilizados: a) Máquina de abrasão Los Angeles; b) Moinho de bolas;



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

A cinza volante necessitou apenas de secagem na estufa a 100 °C por 24 horas. Todos os precursores foram peneirados na peneira N° 100 (150 µm).

3.2.2 Preparação da solução de hidróxido de sódio

Visando uma otimização na preparação das pastas, a solução de hidróxido de sódio foi preparada de maneira antecipada. O procedimento consistiu na dissolução do NaOH em água destilada. Todo o processo de manuseio teve que ser realizado com máxima cautela, pois trata-se de uma base corrosiva, que apresenta enorme risco de queimaduras graves ao operador.

Inicialmente pesou-se a massa de hidróxido de sódio em balança analítica, para posteriormente inseri-la em recipiente de plástico imerso em banho de gelo para um melhor controle da temperatura durante o processo de dissolução. A água foi adicionada de forma fracionada até obter a quantidade desejada de solução, que foi, posteriormente, transferida para um balão de vidro de um litro, que possui uma melhor mensuração. Quando a solução resultante tinha um volume menor que 01 litro, era necessária uma adição de água final para esse preenchimento. Concluída a reação, armazenou-se o material em garrafas de plástico leitoso até o momento de utilização.

3.2.3 Preparação das pastas

Inicialmente pesou-se as massas dos precursores, ativadores e aditivos tensoativos. A solução de hidróxido de sódio foi preparada antecipadamente para otimizar o processo. Após a pesagem, os ativadores foram armazenados em um Becker, de modo a homogeneizar a mistura, permitindo que a reação entre as soluções de silicato e hidróxido de sódio ocorra e seja dissipado o calor resultante dela mesma.

Enquanto isso, mistura-se a escória de aciaria e a cinza volante no recipiente da argamassadeira, onde também foi adicionada a mistura ativadora. Esse processo deve ser feito com delicadeza, e feito manualmente por 1 minuto para pré-homogeneizar todos os materiais, objetivando reduzir os riscos de contato do operador com a solução ativadora.

Após a pré-homogeneização acionou-se a argamassadeira planetária em baixa rotação (62 ± 5 rpm) por 1 minuto e 30 segundos. Passado esse período, a mistura foi deixada a descansar por mais 1 minuto. Ao longo do período de descanso utilizou-se uma espátula para retirar possível material que tenha sido retido nas paredes e no fundo do recipiente, permitindo que este possa ser bem homogeneizado.

Por fim, foi acionada mais uma vez a argamassadeira planetária em baixa rotação (62 ± 5 rpm) por 1 minuto e 30 segundos. Nos traços com uso de aditivo tensoativos, a inserção do produto foi realizada no intervalo entre os períodos de funcionamento da argamassadeira

planetária. A argamassadeira planetária utilizada nesse estudo pode ser visualizada na Figura 6.

Figura 6 - Argamassadeira planetária



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Para esse estudo, o traço referência possui um módulo de sílica ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) igual a 1,25. Uma dosagem de álcalis – M+ (que é a relação entre a porcentagem de Na_2O e a soma dos precursores) igual a 8%. Possui uma proporção de 50/50 dos precursores cinza volante e escória de aciaria BOF. Os demais traços usaram o de referência, variando apenas a concentração e o tipo de aditivo tensoativo, com variações de 1, 3 e 5%. No total foram 7 pastas avaliadas, sendo todas expostas à cura ambiente, posicionadas em formas que serão descritas de acordo com o ensaio a ser realizado, seguindo os parâmetros técnicos presentes na ABNT NBR 13279 (2005).

É importante destacar que o traço de referência foi baseado no trabalho de Araújo (2022), realizado simultaneamente a este. Desta forma, o arranjo dos traços está representado na Tabela 5.

Tabela 5 – Arranjo dos traços

Número do traço	Módulo de Sílica - AM (SiO ₂ /Na ₂ O)	Teor de Álcalis – N% (%Na ₂ O/(BOF+CV))	Relação Cinza Volante - Escória BOF	% de aditivo
1	1,25	8,00%	50-50	1% ADT 1
2	1,25	8,00%	50-50	3% ADT 1
3	1,25	8,00%	50-50	5% ADT 1
4	1,25	8,00%	50-50	1% ADT 2
5	1,25	8,00%	50-50	3% ADT 2
6	1,25	8,00%	50-50	5% ADT 2
7	1,25	8,00%	50-50	-

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Legenda: ADT 1 – aditivo superplastificante; ADT 2 – aditivo plastificante.

3.2.4 Ensaios

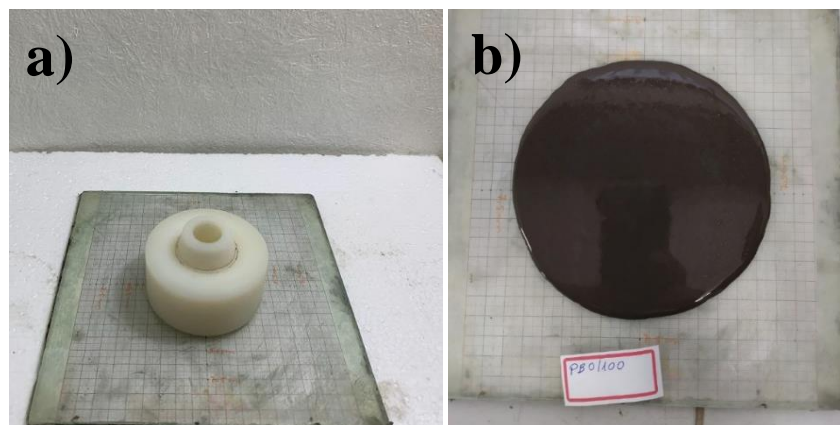
Os ensaios realizados nas pastas foram: no estado fresco - Mini Slump e tempo de pega; e, no estado endurecido - resistência à compressão para idades de 7 e 28 dias.

3.2.4.1 No estado fresco

3.2.4.1.1 Mini abatimento (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: 19mm de diâmetro superior e 39mm de diâmetro inferior. O mini cone usado nesta pesquisa pode ser visualizado na Figura 7 a).

Figura 7 – a) Mini cone; b) Espalhamento de uma das pastas;



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Após o preenchimento do mini cone foi suspenso verticalmente possibilitando a queda de todo material presente no seu interior. Após 30s de tempo de queda, foram aferidas 3 medidas de diâmetro em direções opostas com o auxílio de um paquímetro. O procedimento foi repetido novamente em 1min e 30s e 5min. O resultado foi a média dessas 3 medidas aferidas a cada tempo. Na Figura 7 b) é apresentado um registro da pasta após 5 minutos.

3.2.4.1.2 *Tempo de Pega*

Para uma análise da aplicabilidade desse material em campo, é imprescindível analisar os tempos de pega inicial e final da pasta. A ABNT NBR 7212 (2021) trata do controle tecnológico e aborda o tempo máximo de entrega e aplicação do concreto. Faz-se necessário uma avaliação da mesma em comunhão ao ensaio realizado. Esse procedimento seguiu as recomendações da ABNT NBR 16607 (2018). A referida norma define tempo de início de pega como sendo o intervalo entre o momento que os aglomerantes entram em contato com água até o momento em que a agulha do aparelho penetrada na pasta estaciona a uma distância de 6 ± 2 mm da placa base. De modo semelhante, o tempo de fim de pega é o intervalo entre o momento em que os aglomerantes entram em contato com a água até o momento que a agulha não consegue penetrar mais que 0,5 mm. Tal ensaio é estabelecido para o cimento Portland, portanto, foi adaptado nesse estudo para cimentos álcali-ativados.

Figura 8 – Aparelho de Vicat utilizado



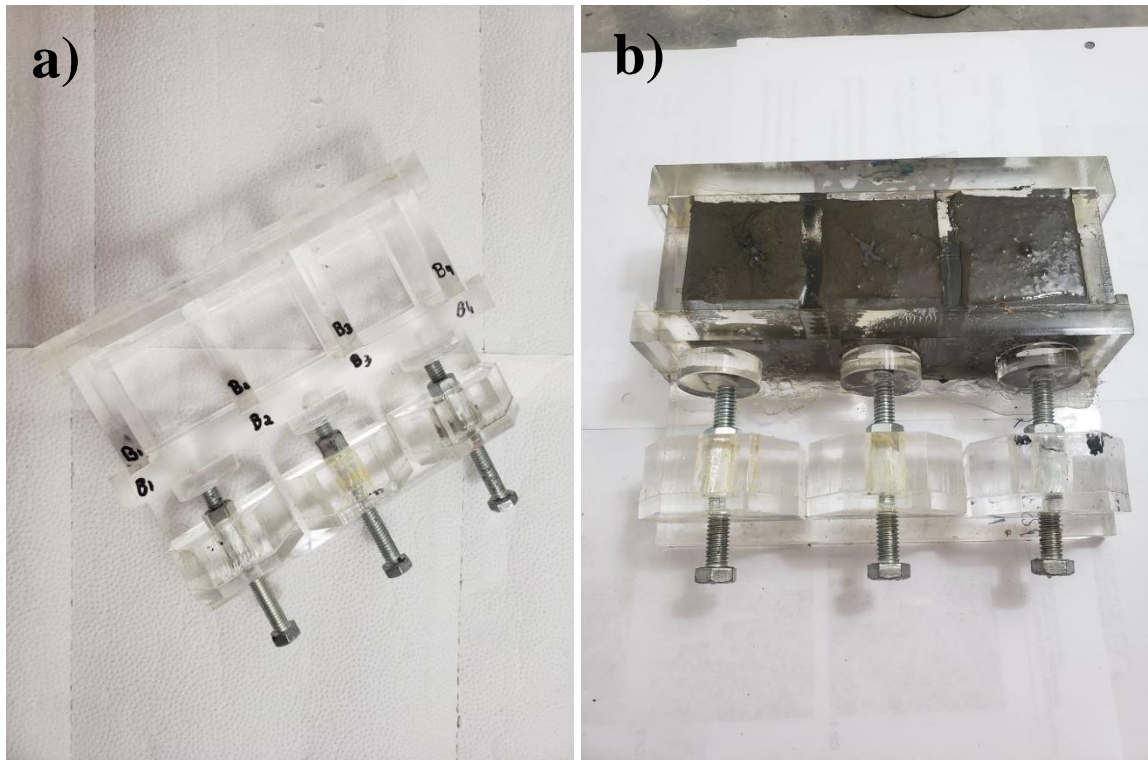
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

3.2.4.2 No estado endurecido

3.2.4.2.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado seguindo os parâmetros técnicos presentes na ABNT NBR 13279 (2005). A pasta foi moldada em moldes cúbicos de 4 cm de aresta, comportando três corpos de prova moldados. A fôrma foi confeccionada em acrílico com paredes lisas e sem reentrâncias ou saliências, como é possível verificar na Figura 9.

Figura 9 - a) ilustração fôrma; b) Corpo de prova moldado na fôrma.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 10 – Ruptura de um dos corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

As pastas foram expostas à cura ambiente e foram realizadas as rupturas dos corpos de prova com 7 e 28 dias, como pode ser verificado na Figura 10. Após o procedimento de produção dos corpos de prova, os mesmos foram desmoldados, separados em sacos plásticos e catalogados de acordo com suas características. O armazenamento em sacos plásticos visa mitigar uma perda excessiva de umidade e uma consequente retração por secagem, além do mais, impede o surgimento de eflorescência percebido no material exposto ao ambiente em algumas dosagens. O resultado do referido ensaio se dá por meio de uma média aritmética dos 3 corpos de prova para cada traço analisado.

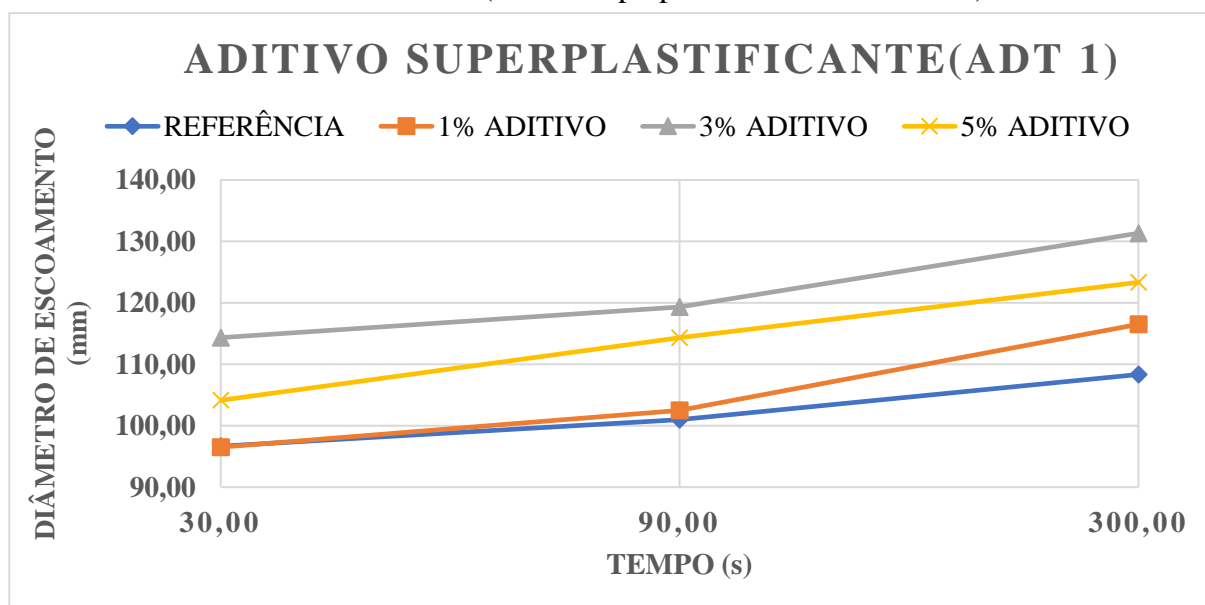
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios no estado fresco e no estado endurecido

4.1 Ensaios no estado fresco

Inicialmente, apresenta-se o Gráfico 1 que expõe os resultados do ensaio de mini abatimento das pastas produzidas com superplastificante (ADT 1).

Gráfico 1 - Diâmetro de escoamento (aditivo superplastificante x referência).



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

O Gráfico 1 ilustra o diâmetro de espalhamento medido a cada tempo em segundos para cada pasta. Percebe-se que para o aditivo superplastificante, a sua inserção provocou um aumento desse diâmetro. Quando a porcentagem do aditivo inserido foi apenas de 1% sobre a massa do aglomerante, esse aumento não foi perceptível nos primeiros momentos de análise, passando a influenciar após 300 segundos, representando 7% no aumento do diâmetro.

Por outro lado, quando inserido o percentual de 3% do aditivo sobre a massa do aglomerante é possível observar uma maior influência e um aumento no diâmetro desde a primeira medida. Possibilitando um aumento de 18% em comparação a pasta de referência, que representa mais que o dobro do aumento proporcionado pela pasta com 1% de aditivo.

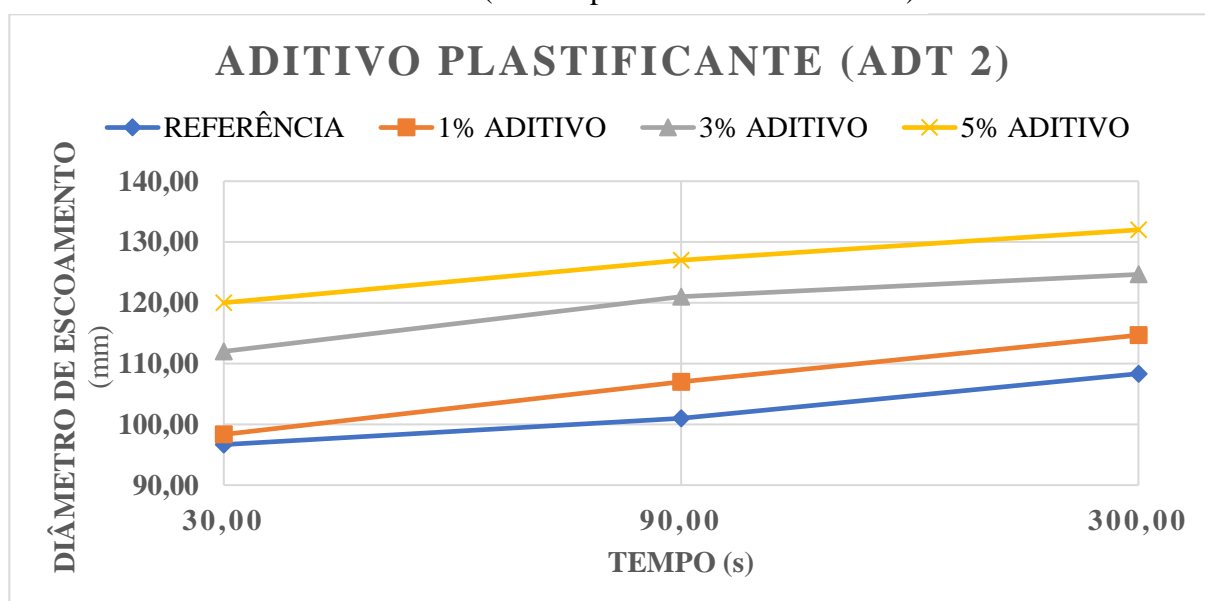
Concomitantemente, ocorreu com a inserção de 5% do aditivo sobre a massa do aglomerante. Entretanto, de acordo com o ensaio, esse percentual teve uma influência bem menor em comparação com ao percentual citado anteriormente, pois possibilitou um aumento de 12% em relação ao escoamento da pasta de referência.

Os resultados coincidem com o que é encontrado atualmente na literatura, que demonstra que o uso de aditivos à base de policarboxilato possuem grande influência no diâmetro de espalhamento das pastas álcali-ativadas. Esses resultados foram observados também no estudo de Shin Hau Bong e Ali Nazari (2019) que mostram um aumento de cerca de 40% no diâmetro de espalhamento das pastas fazendo uso de um aditivo da mesma categoria.

Entretanto, os estudos propostos pelos autores Lee *et al.* (2020) e Fernandes *et al.* (2017) mostraram uma redução desse diâmetro em cerca de 15% e 40%, respectivamente. Contudo, o precursor utilizado no referido trabalho foi o metacaulim. Embora tenha mostrado um resultado discrepante, o estudo de Lee *et al.* (2020) mostrou que o aumento do espalhamento é observado até um determinado percentual de inserção do aditivo, após esse limite há uma diminuição gradual do diâmetro de espalhamento, o que caracteriza um limite de uso do material. Algo semelhante foi observado nesse estudo, que depois da inserção dos 3% do aditivo superplastificante houve uma diminuição no diâmetro de espalhamento.

Os resultados de mini abatimento para o aditivo plastificante (ADT 2) são apresentados no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Diâmetro de escoamento (aditivo plastificante x referência)



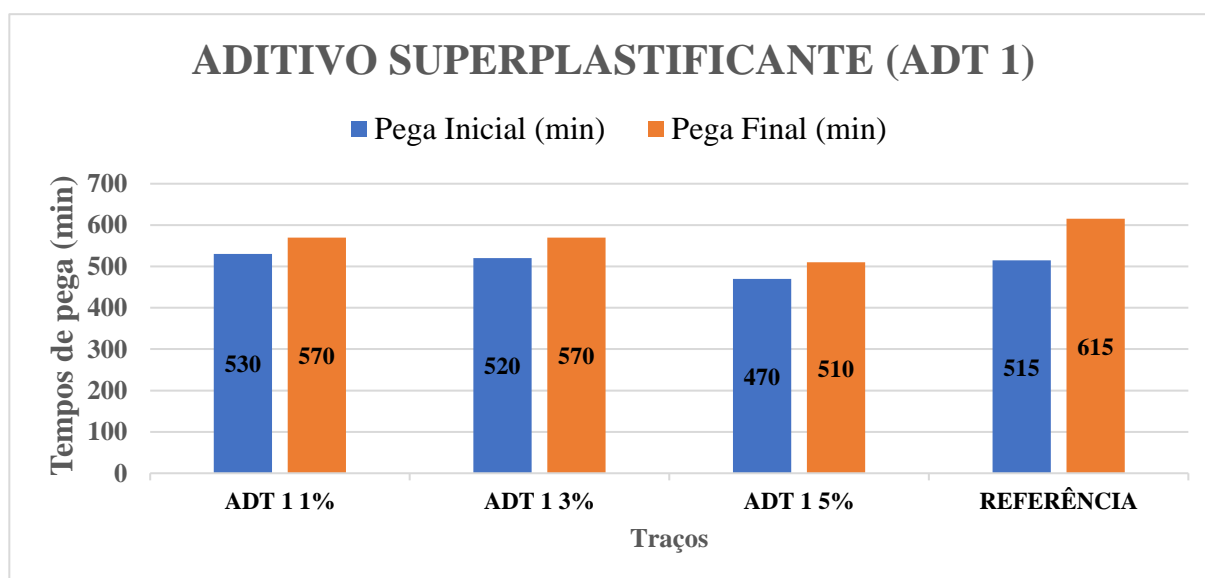
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Os resultados expostos no Gráfico 2 são positivos e mostram uma tendência de aumento do diâmetro de abatimento em cerca de 25% para o maior percentual de adição. Esses resultados, assim como para o aditivo anterior, estão ancorados em alguns trabalhos presentes na literatura. Entretanto, é válido destacar que não foram encontrados estudos referentes a essa categoria de aditivos (plastificantes à base de sais sulfonados).

Diferente do que foi observado nos resultados nas pastas do sistema anterior (Gráfico 1), nesse sistema todos os percentuais de adição representaram aumento do diâmetro de espalhamento. Além do mais, o maior diâmetro de espalhamento foi encontrado no maior percentual de adição. O que indica uma direta proporcionalidade entre as medidas avaliadas.

No Gráfico 3 são apresentados os resultados de tempo de pega inicial e final das pastas produzidas com o aditivo superplastificante (ADT 1).

Gráfico 3 - Tempos de pega inicial e final do aditivo superplastificante



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Como é possível observar, a pasta de referência mostrou um tempo de pega final superior as demais pastas analisadas. Também pode ser notado que a porcentagem de inserção de aditivo supostamente é uma medida inversamente proporcional aos tempos de pega inicial e final. Haja vista que, à medida que é aumentada a proporção de aditivo na mistura, tem-se um menor tempo de pega inicial e final.

Fenômeno semelhante foi encontrado no estudo proposto por Bakharev, Sanhayan e Cheng (2000), em que os autores supuseram que o aditivo superplastificante tenha agido como um acelerador de pega na mistura. Em contrapartida, o estudo de Shin Hau Bong e Ali Nazari

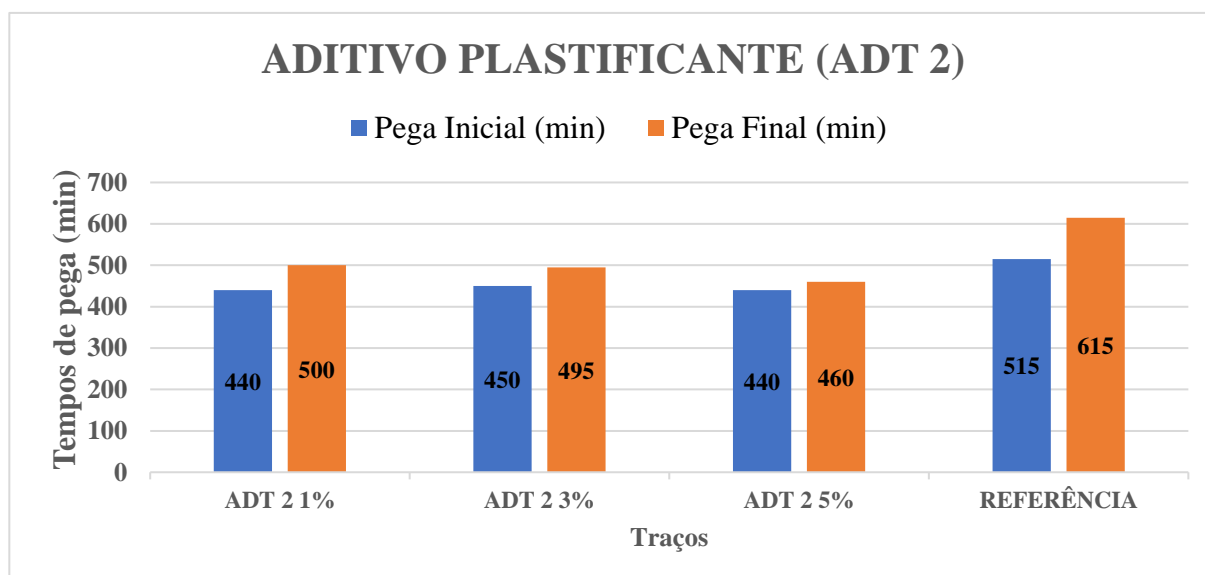
(2019) mostrou que a presença de aditivo superplastificante foi responsável por um aumento nos tempos de pega inicial e final da mistura. Vale considerar que não é possível realizar uma comparação direta, haja vista que os parâmetros e as condições das misturas são diferentes, impossibilitando afirmações conclusivas.

Geralmente, o tempo de pega inicial de cimentos álcali-ativados ocorre aproximadamente 90 minutos após homogeneização da mistura, já o tempo de fim de pega é registrado após passadas 4 horas. Contudo, esses dados variam de acordo com a matéria-utilizada aliada aos fatores de processamento (FANG *et al.*, 2018; CHEN *et al.*,2018;). Deste modo, as pastas avaliadas estão fora desse padrão, mas deve-se levar em consideração que suas condições de produção são diferentes.

Para Neville (2015), os tempos de início e fim de pega variam entre 3 e 4 horas, respectivamente, para o cimento CPV-ARI, o que se traduz também em uma enorme diferença em comparação as pastas. Entretanto, esse fator pode ser preponderante para a produção de concretos usinados, pois possibilitam um maior tempo de transporte entre a usina e o local da obra.

No Gráfico 4 são apresentados os tempos de início e fim de pega das pastas produzidas com o aditivo plastificante (ADT 2).

Gráfico 4 - Tempos de pega inicial e final do aditivo plastificante



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

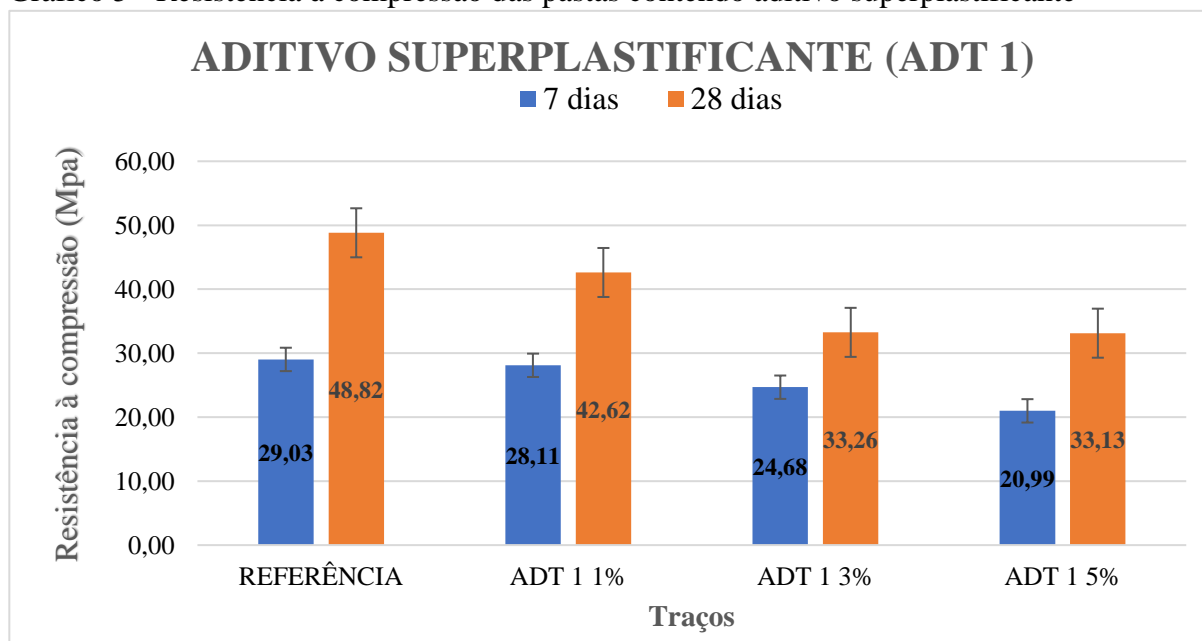
Os resultados de tempo de final de pega para o aditivo plastificante seguiram a tendência de redução, como observado no aditivo analisado anteriormente. Entretanto, é notável uma redução mais acentuada, reduzindo o tempo de fim de pega para 460 minutos, o que corresponde a 50 minutos a menos que o aditivo comparado. No tocante ao tempo de início de pega observa-se condição semelhante. Por outro lado, o resultado não seguiu uma redução tão representativa, como pode ser observado que as adições de 1% e 5% obtiveram o mesmo resultado.

4.2 Ensaios no estado endurecido

No estado endurecido, buscou-se avaliar a influência dos aditivos tensoativos no comportamento mecânico por meio dos ensaios de resistência à compressão.

Na Gráfico 5 são apresentados os resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias e o seus respectivos desvios padrão.

Gráfico 5 - Resistência à compressão das pastas contendo aditivo superplastificante



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Inicialmente, pode-se observar no Gráfico 5 que o aumento do tempo de cura de 7 para 28 dias favoreceu o ganho de resistência mecânica de todas as amostras. A pasta de referência se destaca por obter maior resistência à compressão, 29,03 MPa aos 7 dias, e aos 28 dias, 48,82 MPa. Comportamento semelhante é observado em outros estudos que tratam do aumento da resistência ao longo do tempo e que estão presentes na literatura (SILVA NETO,

2021; ZHANG *et al.*, 2018). Por outro lado, alguns trabalhos mostram menores resistências mecânicas em idades posteriores em virtude de condições inadequadas de cura (ARAÚJO, 2018).

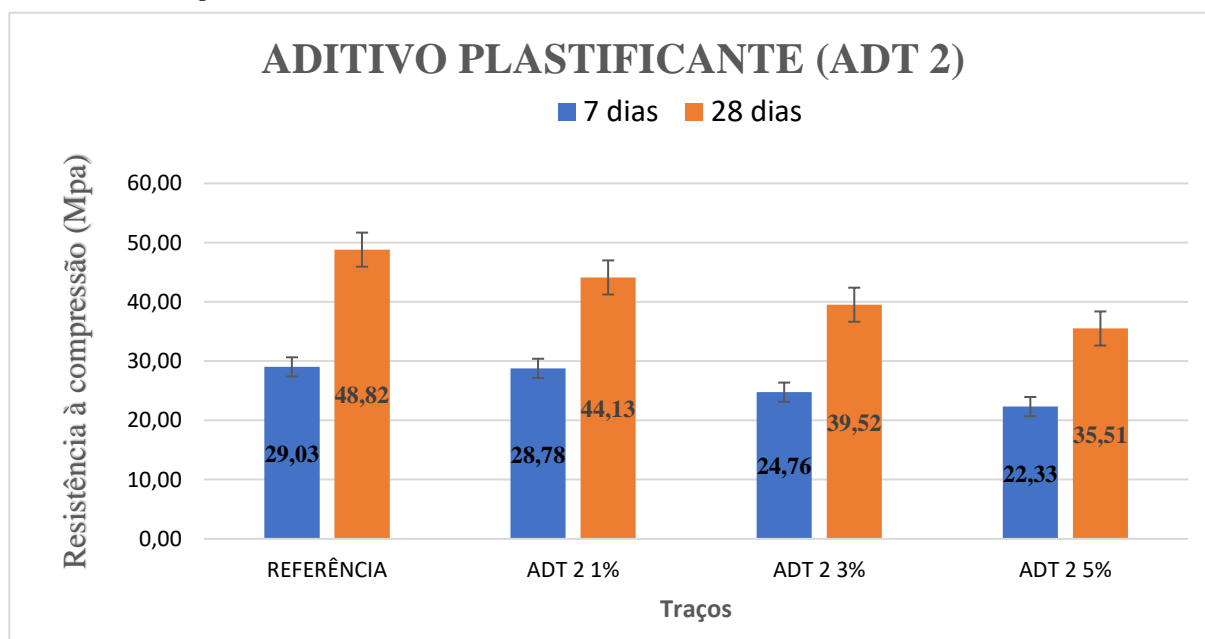
Os resultados mostram ainda que as amostras, com exceção da pasta com adição de 3% de aditivo sobre a massa do aglomerante, não alcançaram taxas superiores a 70% da resistência final obtida aos 28 dias. Esse efeito vai em desacordo com o que é visto na literatura sobre cimentos álcali-ativados, que para molaridades semelhantes a adotada neste estudo obtiveram resultados iniciais melhores (ALBIDAH *et al.*, 2021; TEE *et al.*, 2021; ADESANYA *et al.*, 2021). Entretanto, deve-se destacar que os estudos citados tratam de compósitos à base de metacaulim, e como já citado, a mudança de precursor pode ser preponderante nessas diferenças encontradas.

Complementarmente, os resultados sugerem uma possível influência negativa da inserção do ADT 1 nas pastas. Isso é observado para ambas as idades analisadas. Como pode ser visto, a pasta de referência obteve resistência à compressão acima de 48 MPa, e com o aumento gradual da presença do aditivo, observou-se a redução nos valores alcançados, chegando a aproximadamente 33% de redução em relação à pasta de referência. Proporcionalmente, quanto maior é a presença de aditivo, menor é a resistência da pasta.

No Gráfico 6 são apresentados os resultados de resistência à compressão das pastas contendo aditivo plastificante (ADT 2).

Gráfico 6 - Resistência à compressão das pastas contendo aditivo plastificante

Fonte: Elaborado pelo autor.



De forma semelhante ao que foi observado nos resultados das pastas contendo superplastificante (ADT 1), é possível observar uma diminuição da resistência à compressão das pastas contendo plastificante (ADT 2) com o aumento da proporção de aditivo na mistura, nas idades avaliadas, conforme Gráfico 6.

De modo geral, é possível verificar que os aditivos tensoativos representaram uma redução no índice de resistência à compressão se compararmos com a pasta de referência. O que sugere uma inviabilidade sobre seu uso nesse tipo de material e condições de produção.

Essa tendência negativa também foi observada na literatura, como por exemplo nos trabalhos de Bakharev, Sanjayan e Cheng (2000) e Lee *et al.* (2020), indicando que os aditivos tensoativos não possuem os mesmos efeitos observados em misturas à base de cimento Portland. Contudo, esse mecanismo de ação dos aditivos tensoativos em misturas álcali-ativadas ainda não são bem definidos.

Para as misturas à base de cimento Portland a água tem papel fundamental na resistência mecânica, com o uso de aditivos tensoativos é possível reduzir o consumo de água, melhorando a resistência mecânica dos compósitos. No entanto, para as misturas álcali-ativadas, alguns autores defendem que, toda a água presente na mistura tem o papel apenas de homogeneização e não participam ativamente da reação, evaporando completamente (RAGAN 2008; DAVIDOVITS 1989). Por outro lado, também existem pesquisadores que defendem que, aproximadamente, 10% da água seja consumida nas reações químicas da mistura e não evapore (FANG e KAYALI, 2013). Portanto, ainda não há consenso sobre o papel da água nessas misturas, conseqüentemente, ainda não é possível explicar como os aditivos redutores de água influenciam na resistência mecânica das pastas álcali-ativadas. Portanto, sugere-se estudos aprofundados na microestrutura das pastas para identificar as possíveis alterações ocorridas.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo, a influência do uso de aditivos superplastificantes e plastificantes nas propriedades do estado fresco e do estado endurecido de pastas de cimento álcali-ativados foi analisada. As principais contribuições do estudo estão descritas a seguir:

- O aditivo superplastificante à base de policarboxilato melhorou a trabalhabilidade das pastas de cinza volante e escória de aciaria BOF, conforme observado nas medidas do diâmetro de espalhamento no mini abatimento. O melhor resultado foi obtido com a inserção de 3% do aditivo sobre a massa dos aglomerantes, representando um aumento de cerca de 18% em comparação com a pasta de referência;

- Quando adicionado 5% do aditivo superplastificante sobre a massa dos aglomerantes também houve um aumento de diâmetro. Entretanto, esse aumento não foi tão significativo quanto o percentual citado anteriormente, aproximando-se de 12%. O que sugere um limite de uso desse produto;

- O aditivo plastificante à base de sais sulfonados também apresentou índices de aumento do diâmetro de espalhamento, de modo semelhante ao aditivo superplastificante. Entretanto, para esse sistema não foi observado um limite de uso do produto. Para o maior percentual de inserção, obteve-se um aumento de cerca de 25% desse diâmetro. O que demonstra que seus resultados para esse parâmetro foram melhores em comparação com o outro aditivo usado nessa pesquisa;

- O uso do aditivo superplastificante possibilitou uma redução no tempo de pega final em comparação com a pasta de referência. Além do mais, à medida em que foi aumentada a proporção de aditivo na mistura, observou-se uma diminuição dos tempos de pega inicial e final. O que demonstra supostamente que as medidas sejam inversamente proporcionais;

- O uso dos aditivos superplastificante e plastificante influenciaram nos tempos de fim de pega das pastas, atuando como aceleradores de pega nas condições estudadas;

- No tocante a resistência à compressão, é perceptível para ambos os sistemas, que o aumento do tempo de cura de 7 para 28 dias favoreceu o ganho de resistência mecânica. Entretanto, o maior ganho de resistência foi observado no traço de referência, que evoluiu de 29 Mpa aos 7 dias, para mais de 48 Mpa aos 28 dias;

- Quando usado aditivo superplastificante, as pastas (com exceção da pasta com adição de 3% do aditivo sobre a massa do aglomerante) não alcançaram taxas superiores a 70%

da resistência à compressão aos 7 dias. O que difere do que é encontrado na literatura atualmente;

- Os aditivos superplastificantes e plastificantes influenciaram negativamente a resistência à compressão das pastas, visto que ocorreu a redução da resistência das pastas contendo tais aditivos, comparados à pasta de referência.

De modo geral, a utilização de aditivos comumente empregados em misturas de cimento Portland podem melhorar as propriedades no estado fresco de pastas álcali-ativadas à base de cinza volante e escória de aciaria BOF, no entanto, não beneficiam à resistência à compressão das mesmas.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

As conclusões tomadas neste estudo estão restritas às condições adotadas. Deste modo, fazem-se necessários ao desenvolvimento de trabalhos futuro. Portanto, para avançar mais nesse assunto recomendam-se que sejam adotadas as propostas elencadas a seguir:

- Estudo em variadas condições de cura e variações nos parâmetros de mistura;
- Estudo com uma maior variedade de tipos de aditivos;
- Estudo dos efeitos dos aditivos na microestrutura das pastas;
- Estudos reológicos das pastas no estado fresco;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. 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 13279**: Argamassa Para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1**: Aditivos Químicos Para Concreto de Cimento Portland. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7212**: Concreto Dosado em Central – Preparo, Fornecimento e Controle. Rio de Janeiro, 2021.

ARNOULT, M. et al. How to control the geopolymer setting time with the alkaline silicate solution. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 495, n. January, p. 59–66, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.02.036>>.

ALBIDAH, A. S. Effect of partial replacement of geopolymer binder materials on the fresh and mechanical properties: A review. **Ceramics International**, in February, 2021.

ADESANYA, E. et al. Opportunities to improve sustainability of alkali-activated materials: A review of side-stream based activators. *Journal of Cleaner Production*, v. 286, p. 125558, 2021.

ALREFAEI, Y.; DAI, J. G. Tensile behavior and microstructure of hybrid fiber ambient cured one-part engineered geopolymer composites. **Construction and Building Materials**, v. 184, p. 419–431, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.012>>.

ARAUJO, Lucas Benício Rodrigues. Caracterização de misturas álcali-ativadas à base de cinza volante e escória de aciaria. Dissertação em desenvolvimento (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

CHEN, X.; SUTRISNO, A. STRUBLE, L. Effects of calcium on setting mechanism of metakaolin-based geopolymer. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 101, n. 2, p. 957 – 968, 2018.

COSTA, Heloína Nogueira. Cimentos álcali-ativados à base de cinzas do carvão mineral e de escórias siderúrgicas. Tese em processo de publicação (Doutorado em Engenharia e Ciências de Materiais), Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022

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.

CRiado, M.; PALOMO, A.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A. (2005) **Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products.** *Fuel*. 84: 2048-2054

CHANG, J. J. A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 7, p. 1005–1011, 2003.

DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; PALOMO, A.; VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 2007a.

DUXSON, P. et al. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 269, n. 1–3, p. 47–58, 2005.

DE SILVA, P.; SAGOE-CRENSSTIL, K. Medium-term phase stability of Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O geopolymer systems. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 6, p. 870–876, 2008.
SILVA, P. De; SAGOE-CRENSSTIL, K.; SIRIVIVATNANON, V. Kinetics of geopolymerization: Role of Al₂O₃ and SiO₂. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 4, p. 512–518, 2007.

DUXSON, P.; MALLICOAT, S. W.; LUCKEY, G. C.; KRIVEN W. M.; VAN DEVENTER, J. S. K. The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 292, n. 1, p. 8–20, jan. 2007b.

DUXSON, P.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; MALLICOAT, A. W; KRIVEN, W. M.; VAN DEVENTER, J. S. J. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v, 269, n 1-3, p. 47-58, 2005.

DAVIDOVITS, J. (1994) **Properties of geopolymer cements**, Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine, p. 131–149.

DEGHANI, A.; ASLANI, F.; PANAHI, N.G. Effects of initial SiO₂/Al₂O₃ molar ratio and slag on fly ash-based ambient cured geopolymer properties. **Construction and Building Materials**, v. 296, p. 155–166, 2021.

DAVIDOVITS, J. *Mineral Polymers and Methods of Making Them*. 1982.

FANG, G.; HO, W.; TU, W.; ZHANG, M. Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature. **Construction and Building Materials**, v.172, p. 476 – 487, 2018.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; CRIADO, M. Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: A descriptive model. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 6, p. 1204–1209, 2005.

FRAZÃO, C. et al. Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 80, p. 155–166, 2015.

FLETCHER, R. A. et al. The composition range of aluminosilicate geopolymers. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 25, n. 9, p. 1471–1477, 2005.

FOLLETO, E.L.; GRATIERI, E.; OLIVEIRA, L.H.; JAHN, S.L.. **Conversion of Rice Hull Ash into Soluble Sodium Silicate**. *Materials Research*, vol. 9, No. 3, p (335-338), 2006.

FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; GARCÍA-LODEIRO, I.; PALOMO, A. **Durability of Alkali-activated fly ash cementitious material**. *Advances in Geopolymer Science & Technology. Journal of Materials Science*. 42. P (3055-3065), 2007.

GRANJU, J. L.; BALOUCH, S. U. Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 3, p. 572–577, 2005.

GLUKHOVSKY V. *Ancient, modern and future concretes*. 4. ed. Mumbai, India: Springer Science & Business, 1994. v. 1.

HOSKING, N. C. et al. Corrosion resistance of zinc-magnesium coated steel. **Corrosion Science**, v. 49, n. 9, p. 3669–3695, 2007.

HOSKING, N. C. et al. Corrosion resistance of zinc-magnesium coated steel. **Corrosion Science**, v. 49, n. 9, p. 3669–3695, 2007.

HARDJITO, D., WALLAH, S.E., SUMAJOUW, D.M.J.; RANGAN, B.V. (2005) **Introducing fly ash -based geopolymer concrete: manufacture and engineering properties**. *Our World in Concrete and Structures International Conference*, Singapore, 2005.

ILLER, R.K. **The Chemistry of silica** : solubility, polymerization, colloid and Surface properties, and biochemistry. New York: J. Wiley & Sons, 1979. (Cap. 1 – The Occurrence, Dissolution, and Deposition of silica; Cap. 2 – Polymerization of Silica; Cap. 3 – Water-Soluble Silicates).

JUENG SUWATTANANON, K. et al. Correlation between initial SiO₂/Al₂O₃, Na₂O/Al₂O₃, Na₂O/SiO₂ and H₂O/Na₂O ratios on phase and microstructure of reaction products of metakaolin-rice husk ash geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 406–417, 2019.

JUENGER, M.C.G, WINNEFELD, F., PROVIS, J.L., IDEKER, J.H. *Advances in alternative cementitious binders*. *Cement and Concrete Research*, Volume 41, Issue 12, December 2011, Pages 1232-1243.

KHALE, D., CHAUDHARY, R. (2007) **Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review.** *Journal of Materials*. 42: 729–746.

KARAKOÇ, M. B. et al. Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolymer paste and mortar. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 283–292, 2014.

KHALE, D.; CHAUDHARY, R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 3, p. 729–746, 2007.

LIMA, F. T; SILVA F. J.; THAUMATURGO, C. (2005) **Xanes na borda-k do Si do sistema caulim-metaculim-geopolímero.** *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*. 24(2): 90-92.

LLOYD, R.R.. Accelerated Agein of Geopolymers. In: PROVIS, J.L; VAN DEVENTER, J.S.J. *Geopolymers: Struture, Processing, Properties and Industrial Applications*. Woodhead Publishing Limi, Oxford – Cambrigd – New Delhi. P(139-166).

LEE, W. K. W.; VAN DEVENTER, J. S. J. The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 4, p. 577–584, 2002.

LONGHI, M. A. **Álcali-ativação de lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo.** Tese de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 2015.

LIVI, C. N. **Desenvolvimento de pasta de geopolímeros a base de cinza volante e hidróxido de sódio.** Tese de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis-SC, 2013.

MASON, B. *Principles of geochemistru*. 3. Ed. New York: Wiley, 1966. 329 p.
SINGH, B.; ISHWARYA, G.; GUPTA, M.; BHATTACHARYYA, S.K. Geopolymer concrete: A review of some recent developoments. *Construction and Building Materials*, v. 85, p. 78-90, 2015.

MACIOSKI, G.; *Estudo da Álcali-Ativação de Pó de Blocos Cerâmicos com Cal Hidrata*. 2015. 173 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná), Curitiba, 2017.

MOHAJERAMI, Abbas; SUTER, David; JEFFREY-BAILEY, Tristan; SONG, Tianyang; ARULRAJAH, Arul; HORPIBULSUK, Suksun; LAW, David. Recycling waste materials in geopolymer concrete. *Clean Technologies and Environmental Policy*, Alemanha, P (493-515), janeiro, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10098-018-01660-2>>.

MUSADDIQ LASKAR, S.; TALUKDAR, S. Development of Ultrafine Slag-Based Geopolymer Mortar for Use as Repairing Mortar. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 5, p. 04016292, maio 2017.

MANSO, JUAN Manuel; HERNÁNDEZ, David; LOSÁÑEZ, Maria Milagros; GONZÁLEZ, Javier Jesús. Design and elaboration of concrete mixtures using steelmaking slags. **ACI Materials Journal**, v. 108, n. 6, p. 673–681, 2011.

PROVIS, J.L.; VAN DEVENTER, J.S. **Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report**. Dordrecht : Springer, 2014.

PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J.; LEONELLI, C.; PALOMO, A. **Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes**. Woodhead P ed. Cambridge: Elsevier Ltd, 2014.

PACHECO-TORGAL, F.; GOMES, J. P. C.; JALALI, S. Argamassas antigas: Reacção Pozolânica ou Activação Alcalina? 2 o Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, 2007.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. (1999) **Alkali-activated fly ashes. A cement for future**. *Cement and Concrete Research*. 29: 1323-1329, 1999.

PINTO, A.T. **Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina do Metacaulino**. Tese Doutorado, Universidade do Minho, Portugal. 2004.

PROVIS, J. L. ; BERNAL, S. A. (2014) **Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials**. *Annual Review of Materials research*. 44: 299-327.

PINTO, A. T. Introdução ao estudo dos geopolímeros. **Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro**. p. 88. Vila Real, 2006.

PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P.; MIKOWSKI, A. Propriedades nanomecânicas do silicato de cálcio hidratado de síntese. *Ambiente Construído*, v. 9, n. 42, p. 129–139, 2009. Disponível em: <<https://www.seer.ufgrs.br/ambienteconstruido/article/viewArticle/9438>>. Acesso em: 14 jul. 2021.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Geopolymers: Structures, processing, properties and industrial applications**. Woodhead Publishing Limited, 2009.

PROVIS, J.L; VAN DEVENTER, J.S. **Geopolymers and Other Alkali-Activated Materials**. HEWLETT, P.C; LISKA, M. *Lea's Chemistry of cement and concrete*. Butterworth-heinemman, 2019.P.(779)-(805).

ROWLES, M.; O'CONNOR, B. Chemical optimisation of the compressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesised by sodium silicate activation of metakaolinite. **Journal of Materials Chemistry**, v. 13, n. 5, p. 1161–1165, 2003.

RASHAD, A. M. Effect of steel fibers on geopolymer properties – The best synopsis for civil engineer. **Construction and Building Materials**, v. 246, p. 118534, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118534>>.

SIMÕES, A., *et al*. **Ciência e Engenharia de Materiais de Construção**. 1. ed. atual. São Paulo: IST Press, 2012. 1057 p.

SHARP, J.H.; MACPHEE, D. E.; GARTNER, E. M. Novel cement systems (sustainability). Session 2 of the Fred Glasser Cement Science Symposium. *Advances in Cement Research*, v. 22, n. 4, p. 195-202, 2010.

STEVESON, M.; SAGOE-CRENTSIL, K. Relationships between composition, structure and strength of inorganic polymers : PPPPart I Metakaolin-derived inorganic polymers. *Journal of Materials Science*, v. 40, n. 8, p. 2023–2036, 2005.

SILVA, J. C. **A influência da adição de fibras de polipropileno e vermiculita expandida em argamassas com nanotitânia**. 2015. 63 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Joinville, 2015.

TALLING, B.; BRANDSTETR, J. Present State and Future of Alkali-activated Slag Concretes. *Symposium paper*, v. 114, p. 1519- 1546, 1989.

TEE, K. F.; MOSTOFIZADEH, S. A mini review on properties of Portland cement concrete with geopolymer materials as partial or entire replacement. *Infrastructures*, v. 6, n. 2, p. 1 – 21, 2021.

TARGINO, L. D.; ARAUJO, L.B.; PAIVA, A.; COSTA, H.N.; BABADOPULOS, L.; CABRAL, A.E.B. Concretos sustentáveis com aglomerantes geopoliméricos e agregados de escória de aciaria BSSF: caracterização mecânica e análise de impacto ambiental. Trabalho em desenvolvimento (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

TEMUJIN, J. et al. Preparation of metakaolin based geopolymer coatings on metal substrates as thermal barriers. *Applied Clay Science*, v. 46, n. 3, p. 265–270, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2009.08.015>>.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará**. Fortaleza, 2013.

VARGAS, A.S.; DAL MOLIN, D.C.C.; VILELA, A.C.F.; JALALI, S.; GOMES, J.C. Cinzas volantes álcali-ativadas com solução combinada de NaOH e Ca(OH)₂. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 12, n. 3, p. 462–469, 2007.

VARGAS, A. S.; SCHNEIDER, E. L.; SCHMITZ, G.; AQUIM, P. M.; DE VARGAS, A. S.; SCHNEIDER, E. L.; SCHMITZ, G.; DE AQUIM, P. M. Argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes álcali-ativadas contendo areia de fundição. *Cerâmica*, v. 61, n. 359, p. 317–322, 2015.

VAN JAARVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J.; LORENZEN, L. (1997) **The potencial use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: part I. Theory and applications**. *Minerals Engineering*. 10: 659-669.

V., B.; RANGAN. FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE (Column). **Engineering Faculty Curtin University of Technology Perth, Australia**, p. 3124–3130, 2008.

VASSALO, E. A. S. Obtenção de Geopolímero a partir de Metacaulim ativado. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

WIJAYA, Adhitya Leonard; EKAPUTRI, Januarti Jaya; TRIWULAN. Factors influencing strength and setting time of fly ash based-geopolymer paste. **MATEC Web of Conferences**, v. 138, p. 01010, 30 dez. 2017.

WELDES, H.H.; LANGE, K.R. Properties of soluble silicates. **Ind. & Eng. Chemistry**, v.61, n. 4, p. 29-44, april 1969.

YANG, J. et al. Influence of steel slag powders on the properties of MKPC paste. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 137–146, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.081>>.

ZHANG, P. et al. A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. **Composites Part B: Engineering**, v. 152, n. April, p. 79–95, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.031>>.

ZHANG, Peng; ZHENG, Yuanxun; WANG, Kejin; ZHANG, Jinping. A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. **Composites Part B: Engineering**, v. 152, n. June, p. 79–95, 2018.