



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PHABLO HENRIQUE CUNHA CAETANO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO DE
PASTAS ALCALÍ ATIVADAS À BASE DE CINZAS DE COMBUSTÃO DE CARVÃO
MINERAL E DE ESCÓRIA DE ACIARIA**

CRATEÚS

2021

PHABLO HENRIQUE CUNHA CAETANO

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO DE
PASTAS ALCALÍ ATIVADAS À BASE DE CINZAS DE COMBUSTÃO DE CARVÃO
MINERAL E DE ESCÓRIA DE ACIARIA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Área de concentração: Materiais e métodos construtivos.

Orientadora: Prof. Ma. Tatiane Lima Batista.

CRATEÚS

2021

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)

-
- C131a Caetano, Phablo Henrique Cunha.
Análise do comportamento no estado fresco e endurecido de pastas álcali ativadas à base de cinzas de combustão de carvão mineral e de escória de aciaria / Phablo Henrique Cunha Caetano. – 2021.
72 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2021.
Orientação: Profa. Ma. Tatiane Lima Batista.
1. Cinza volante. 2. Escória de aciaria. 3. Cinza pesada. 4. Cimento álcali ativado. 5. Cinzas de combustão de Carvão Mineral. I. Título.

PHABLO HENRIQUE CUNHA CAETANO

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO DE
PASTAS ALCALÍ ATIVADAS À BASE DE CINZAS DE COMBUSTÃO DE CARVÃO
MINERAL E DE ESCÓRIA DE ACIARIA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Área de concentração: Materiais e métodos construtivos.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ma. Tatiane Lima Batista (Orientadora)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ma. Heloína Nogueira da Costa

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral

Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.

Aos meus familiares, em especial, à minha mãe
Telma e à minha avó Maria (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida.

À minha família, em especial a minha mãe e minha avó, por terem me apoiado em todas as decisões na minha vida.

À Prof. Ma. Tatiane Lima Batista, pela excelente orientação durante a execução deste trabalho.

Aos professores da graduação, em especial à Prof. Ma. Heloína Nogueira da Costa, por todo o conhecimento repassado.

À equipe do Laboratório de Materiais da Construção Civil da UFC – Campus do PICI, em especial ao Prof. Dr. Eduardo Bezerra Cabral, pela disponibilização do laboratório e pelo apoio prestado.

Ao Complexo Industrial e Portuário do Pecém, pela disponibilização de materiais.

Aos meus colegas de graduação, Dayanne, Amanda, Gabriela, Nargila, Alverne, Felipe Seixas e Maílson Mourão, por todo companheirismo e ajuda nos momentos difíceis da graduação.

Aos amigos que adquiri em Crateús que mostraram uma amizade além dos termos da graduação, ajudando com conselhos e incentivando a conclusão da graduação, Felipe Sousa, Douglas Ribeiro, Hildenice, Amanda Castro e Carlos Magno.

Aos amigos que estiveram comigo durante a pandemia, ajudando a manter a mente firme para conseguir terminar este trabalho, Felipe Vasconcelos, Kelton e Jefferson.

Aos meus amigos de infância, que nunca me deixaram desanimar e me ajudaram a seguir em frente, Andreza, Géssyca, Júlio, Larissa, Lorena e Luana.

Muito obrigado!

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.
Marthin Luther King

RESUMO

O aglomerante mais utilizado na construção civil é o cimento Portland, no entanto, esse material é um grande emissor de dióxido de carbono (CO₂). Por esta razão, novos materiais têm sido investigados com o intuito de substituir totalmente, ou em partes, o uso desse aglomerante. Nesse cenário, o cimento álcali ativado surge como uma alternativa. Esse material pode ser obtido a partir de precursores como cinza volante, cinza pesada e a escória de aciaria. Por se tratar de um novo tipo de material aglomerante, este trabalho foca em analisar a suas principais características, tais como a trabalhabilidade, o tempo de pega e a resistência à compressão. Essas propriedades foram analisadas por meio da confecção de pastas simples e binárias, utilizando como ativadores o hidróxido de sódio e o silicato de sódio, divididas em três sistemas, contendo pares de precursores, e na posterior realização de ensaios como mini slump, funil de Marsh, ensaio de tempo de pega e ensaio de resistência à compressão. Através dos ensaios realizados pode-se observar que a cinza pesada, juntamente com a cinza volante não proporcionaram um tempo de pega ideal para o uso na construção civil, uma vez que, por exemplo, a pasta que continha 100% de cinza pesada, no sistema VP, não apresentou sinal de pega, o mesmo ocorreu para o sistema PB e ao acrescentar apenas 25% de escória de aciaria, nesse sistema, o tempo de pega inicial passou a ser em torno de 14,4 horas, fazendo com que a escória funcionasse como um acelerador de pega. Além disso, na proporção correta, a escória de aciaria quando misturada com as cinzas de combustão de carvão mineral, acaba influenciando positivamente na trabalhabilidade e na resistência à compressão, chegando a atingir valores, aos 28 dias, tais como 38,73 MPa, contendo 50% de cinza volante e 50% de escória de aciaria. Sendo assim, pode-se dizer que a escória de aciaria contribui de maneira significativa, quando incorporado a pastas à base de cinzas de combustão de carvão mineral.

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

ABSTRACT

The most used binder in civil construction is Portland cement, however, this material is a large emitter of carbon dioxide (CO₂). For this reason, new materials have been investigated to fully or in part replace the use of this binder. In this scenario, activated alkali cement emerges as an alternative. This material can be obtained from precursors such as fly ash, bottom ash and steel slag. As it is a new type of binder material, this work focuses on analyzing its main characteristics, such as workability, setting time and compressive strength. These properties were analyzed by making simple and binary pastes, using as activators sodium hydroxide and sodium silicate, divided into three systems, containing pairs of precursors, and in the subsequent performance of tests such as mini slump, Marsh funnel, setting time and compression strength. Through the tests performed it can be observed that the bottom ash, together with the fly ash did not provide an ideal initial setting time for use in civil construction, since, for example, the paste containing 100% bottom ash, in the VP system, did not show a handle signal, the same occurred for the PB system and by adding only 25% of steel slag, in this system, the initial setting time became around 14.4 hours, making the slag function as a handle accelerator. Moreover, in the correct proportion, the steel slag when mixed with the combustion ash of coal, ends up positively influencing the workability and compressive strength, reaching values, at 28 days, such as 38.73 MPa, containing 50% of fly ash and 50% of steel slag. Thus, it can be said that the slag of a ciary contributes significantly when incorporated into pastes based on coal combustion ash.

Keywords: Fly ash. Steel slag. Bottom ash. Alkali activated cement. Setting time. Tempo de pega. Compressive strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mecanismo geral para álcali ativação	21
Figura 2 - Fluxograma de procedimentos experimentais	29
Figura 3 - Aparelho de abrasão Los Angeles	31
Figura 4 - Moinho de bolas.....	31
Figura 5 – Distribuição granulométrica da cinza volante.....	32
Figura 6 – Distribuição granulométrica da cinza pesada.....	32
Figura 7 – Distribuição granulométrica da escória BOF.....	33
Figura 8 - Mistura da pasta em argamassadeira planetária.....	37
Figura 9 – Mini cone	38
Figura 10 – Espalhamento da pasta no Mini slump	39
Figura 11 - Funil de Marsh.....	40
Figura 12 - Aparelhagem do ensaio de tempo de pega.....	41
Figura 13 - Corpos de prova do ensaio de resistência à compressão	42
Figura 14 - Condição de cura	42
Figura 15 - Mini slump do sistema VP.....	44
Figura 16 - Índice de fluidez do sistema VP	44
Figura 17 - Espalhamento da pasta VP 0/100	45
Figura 18 - Tempo de pega inicial do sistema VP.....	46
Figura 19 - Pasta VP 0/100 após decorridas 100 horas	47
Figura 20 - Tempo de fim de pega do sistema VP	48
Figura 21 - Resistência à compressão do Sistema VP.....	49
Figura 22 - Mini slump do sistema PB	51
Figura 23 - Pasta PB 0/100.....	52
Figura 24 - Índice de fluidez do sistema PB.....	52
Figura 25 - Tempo de pega inicial do sistema PB.....	53
Figura 26 - Tempo de fim de pega para o sistema PB.....	54
Figura 27 - Resistência à compressão do sistema PB.....	55
Figura 28 - Mini slump do sistema VB	57
Figura 29 - Tempo de pega inicial do sistema VB	58
Figura 30 - Tempo de fim de pega do sistema VB.....	58
Figura 31 - Resistência à compressão do sistema VB.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química dos precursores	30
Tabela 2 – Distribuição granulométrica dos precursores	33
Tabela 3 - Caracterização das soluções de hidróxido de sódio	34
Tabela 4 - Caracterização do silicato de sódio	34
Tabela 5 - Matriz experimental dos cimentos binários.....	36
Tabela 6 - Velocidade de pega do sistema VP	48
Tabela 7 - Taxa de ganho de resistência do sistema VP.....	50
Tabela 8 - Velocidade de pega do sistema PB.....	55
Tabela 9 - Taxa de ganho de resistência do sistema PB.....	56
Tabela 10 - Velocidade de pega do sistema VB	59
Tabela 11 - Taxa de ganho de resistência do sistema VB	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo Geral.....	14
1.2	Objetivos Específicos	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Materiais álcali ativados.....	15
2.1.1	<i>Precursores com alto teor de cálcio.....</i>	<i>16</i>
2.1.2	<i>Precursores com baixo teor de cálcio.....</i>	<i>18</i>
2.2	Ativadores.....	22
2.2.1	<i>Hidróxido de sódio</i>	<i>23</i>
2.2.2	<i>Silicato de sódio.....</i>	<i>23</i>
2.2.3	<i>Outros ativadores</i>	<i>24</i>
2.3	Propriedades dos cimentos álcali ativados	25
2.3.1	<i>Propriedades no estado fresco</i>	<i>26</i>
2.3.2	<i>Propriedades no estado endurecido.....</i>	<i>27</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	Materiais	30
3.1.1	<i>Precursores.....</i>	<i>30</i>
3.1.2	<i>Ativadores</i>	<i>34</i>
3.2	Métodos de pesquisa	34
3.2.1	<i>Mistura e preparação das pastas</i>	<i>34</i>
3.2.2	<i>Ensaio realizados.....</i>	<i>37</i>
3.2.2.1	<i>Mini slump.....</i>	<i>37</i>
3.2.2.2	<i>Índice de fluidez</i>	<i>39</i>
3.2.2.3	<i>Tempo de pega</i>	<i>40</i>
3.2.2.4	<i>Resistência à compressão.....</i>	<i>41</i>

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	Sistema cinza volante e cinza pesada	43
<i>4.1.1</i>	<i>Resultados dos ensaios em estado fresco</i>	<i>43</i>
<i>4.1.2</i>	<i>Resistência à compressão</i>	<i>49</i>
4.2	Sistema de cinza pesada e escória BOF	51
<i>4.2.1</i>	<i>Resultados dos ensaios em estado fresco</i>	<i>51</i>
<i>4.2.2</i>	<i>Resistência à compressão</i>	<i>55</i>
4.3	Sistema de cinza volante e escória BOF	56
<i>4.3.1</i>	<i>Resultados dos ensaios em estado fresco</i>	<i>57</i>
<i>4.3.2</i>	<i>Resistência à compressão</i>	<i>59</i>
4.4	Influência dos precursores nas propriedades investigadas.....	60
5	CONCLUSÕES.....	63
5.1	Sugestões de trabalhos futuros	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é o aglomerante mais utilizado, mundialmente, na confecção de argamassas e concretos. Contudo, a sua cadeia produtiva é considerada uma grande geradora de dióxido de carbono (CO_2), causando impactos ambientais negativos. Nesse aspecto, uma alternativa sustentável à essa questão são os cimentos álcali ativados.

Os cimentos álcali ativados são compostos por materiais em pó, ricos em aluminossilicatos misturados em uma solução alcalina. O primeiro é denominado de precursor e o segundo é denominado de ativador. Os precursores podem ser naturais e residuais de outros processos industriais, como as escórias siderúrgicas e as cinzas do carvão mineral. Estão divididos em: grupo de precursores com baixo teor de cálcio e grupo de precursores com alto teor de cálcio (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

As cinzas de combustão de carvão mineral, em sua grande maioria precursores de baixo teor de cálcio, são resíduos gerados a partir da queima de combustíveis fósseis, usados em indústrias e na geração de energia elétrica. Essas cinzas, geralmente, são classificadas em cinzas volante, também conhecida como cinza leve, e cinza pesada (LIVI, 2013). Por outro lado, as escórias metalúrgicas são reconhecidas como precursores com alto teor de cálcio. Todavia, a escória de alto forno, oriunda da produção do ferro-gusa, é amplamente empregada na indústria cimenteira como adição mineral, assim como boa parte de cinzas volantes. Portanto, para uso em cimentos álcali ativados tem-se buscado outras fontes de aluminossilicatos, seja oriundo de argilas naturais ou de resíduos industriais, como as cinzas pesadas e escórias de aciaria.

No estado do Ceará, há grande disponibilidade de cinzas volantes e pesadas, assim como, de escórias de aciaria. O grande produtor de cinzas volantes e pesadas do estado é o Complexo Termelétrico do Pecém, formado pelas usinas termelétricas instaladas no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), em São Gonçalo do Amarante-CE. De acordo com um estudo realizado por Vasconcelos (2018), entre os meses de janeiro a setembro, foram produzidas em média 11.415 toneladas de cinzas mensais, das quais cerca de 87% correspondem a cinzas volantes e 13% às cinzas pesadas. Da quantidade de cinzas volantes produzidas, 40% foram destinadas para uma cimenteira da região e 60% foram armazenadas no pátio da própria usina. Ainda na região do Pecém também são produzidas escórias de aciaria, e

de acordo com a Companhia Siderúrgica do Pecém - CSP (2020), para cada tonelada de aço líquido processado, são gerados em torno de 100 a 150 quilos de escória de aciaria.

O uso de cinza volante em cimentos álcali ativados está em amplo crescimento (AZEVEDO *et al.*, 2017; LIVI; REPETTE, 2015; VARGAS *et al.*, 2015; WIJAYA; EKAPUTRI; TRIWULAN, 2017), contudo, foi observado que o tempo de pega inicial de materiais álcali ativados com cinzas volante apresentam grande variação. Essa propriedade é geralmente influenciada pelo teor de cálcio encontrado nos precursores, ou seja, nas cinzas volantes (WIJAYA; EKAPUTRI; TRIWULAN, 2017). Sendo assim, precursores que contém uma alta porcentagem de cálcio em sua composição tendem a ter um tempo de pega acelerado comparado com aqueles que tem um baixo teor de cálcio. Por exemplo, em um estudo desenvolvido por Leonard Wijaya, Jaya Ekaputri e Triwulan (2017), pastas de cinzas volantes com percentual de cal abaixo de 10% demoraram em média 450 minutos para ter tempo inicial de pega. Em contrapartida, pastas com teor maior que 20% tiveram tempo inicial de pega em torno de 10 minutos.

O tempo de pega deve atender as necessidades de aplicação dos materiais na construção civil. Para os cimentos Portland, de acordo com a ABNT NBR 16697 (2018), o tempo de início da pega deve ser igual ou superior a 1 hora e o tempo de fim de pega deve ser igual ou inferior a 10 horas. No entanto, os maiores tempos para iniciar e finalizar a pega de materiais álcali ativados à base de cinza volante podem ser considerados inviáveis para a aplicação em temperatura ambiente, uma vez que o prazo chega a ser superior ao do cimento Portland.

Pode-se verificar que os trabalhos que avaliam o tempo de pega de misturas álcali ativadas apresentam resultados diversos, portanto, ainda não há consenso entre os pesquisadores (MANSO *et al.*, 2011; WIJAYA; EKAPUTRI; TRIWULAN, 2017; ZHANG *et al.*, 2018). Desse modo, é fundamental que mais estudos sejam desenvolvidos sobre o tema. Isso se faz necessário para que materiais álcali ativados à base de cinzas do carvão mineral possam ser aplicados para fabricação de argamassas e concretos na construção civil, em temperatura ambiente, assim como, o cimento tradicional.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é investigar o comportamento, em temperatura ambiente, no estado fresco e no estado endurecido de misturas álcali ativadas à base de cinzas do carvão mineral e escória de aciaria, utilizando hidróxido de sódio e silicato de sódio como solução ativadora.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Avaliar o comportamento no estado fresco de misturas simples e binárias de cinzas de combustão de carvão mineral e de escória de aciaria;
- b) Avaliar o comportamento da resistência à compressão de misturas simples e binárias de cinzas de combustão de carvão mineral e escória de aciaria;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Materiais álcali ativados

Os materiais álcali ativados são geralmente definidos como um material aluminossilicato sólido e estável, formado por uma ativação alcalina de um precursor sólido, geralmente em pó. Este material teve grande ascensão em meados da década de 70, onde começou a ser estudado pelo cientista e engenheiro francês Joseph Davidovits. No decorrer dos anos, baseando-se no estudo desse cientista, diversos produtos com alta resistência ao fogo foram desenvolvidos (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

Atualmente, a sua principal aplicação é na construção civil, podendo ser usado para a fabricação de pastas, argamassas e concretos, substituindo parte do cimento Portland e, sendo assim, uma alternativa ecológica. De acordo com Palomo, Grutzeck e Blanco (1999), a álcali-ativação é um processo químico que permite transformar estruturas vítreas (parcialmente ou totalmente amorfas e/ou metaestável) em um material bem compactado e cimentício.

Os pesquisadores Palomo, Grutzeck e Blanco (1999), dividem a ativação alcalina em dois diferentes modelos, tomando exemplos para ambos os casos, tem-se:

- a) o primeiro modelo é representado pela ativação de escórias de alto forno em uma solução alcalina leve;
- b) o segundo modelo é dito como álcali-ativação de metacaulim e de cinzas volantes.

Tais modelos foram adotados por diversos autores em suas pesquisas (HEAH *et al.*, 2012; LI; SUN; LI, 2010; VARGAS *et al.*, 2007) e são diferenciados de acordo com a composição do material a ser ativado e a concentração de ativador usado no processo. A composição do primeiro modelo é praticamente de silício (Si) e cálcio (Ca), e a concentração do ativador na mistura deve ser baixa.

Para o segundo modelo, a composição é essencialmente de silício (Si) e alumínio (Al) e o ativador deve ter uma alta concentração. Essa classificação pode ser resumida pela definição de Provis e Van Deventer (2014), que classificam os materiais que serão ativados de acordo com o teor de cálcio, sendo nomeados como precursores com alto teor de cálcio (escórias de alto forno) e precursores com baixo teor de cálcio (metacaulim e cinza volante).

2.1.1 Precursores com alto teor de cálcio

Os precursores com alto teor de cálcio são materiais que em sua composição tem uma porcentagem de cálcio elevada, geralmente acima de 35%. O principal exemplo desse precursor é a escória de alto forno, derivada da fabricação do ferro gusa. Provis e Van Deventer (2014) afirmam que essa escória, ao servir de base para materiais álcali ativados, produz uma reação altamente heterogênea, isso se dá por conta de quatro mecanismos:

- a) dissolução das partículas precursoras vítreas;
- b) nucleação e crescimento das fases sólidas iniciais;
- c) interações e ligação mecânica nos componentes das fases formadas e reação contínua através de equilíbrio químico dinâmico;
- d) difusão de espécies reativas através dos produtos de reação formados em tempos de cura avançados.

Argamassas e concretos à base de escória de alto forno álcali ativada, quando comparados com aqueles feitos somente à base de cimento Portland, obtêm boas características, tais como, uma resistência mecânica mais alta, menor permeabilidade, melhor resistência à altas temperaturas, maior resistência à ataques químicos, dentre outras propriedades (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PUERTAS; ARTEAGA, 1998).

Além da escória de alto forno, existem outros tipos de escórias, entre elas, as produzidas a partir da fabricação do aço, denominadas como escória de aciaria. Existem diversos tipos desse precursor, dentre eles inclui-se a escória de forno de arco elétrico (EAF – *Electric Arc Furnace*) e a escória de forno básico de oxigênio (BOF – *Basic Oxygen Furnace*). Além desses dois principais tipos, pode-se citar a escória tipo PANELA e a escória tipo conversor (KR) (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

As escórias BOF e EAF são derivadas da fabricação do aço e são compostas principalmente por agentes fundentes, usados durante o processo para obtenção do aço. Assim como a escória de alto forno, a composição da escória BOF e da escória EAF, na grande maioria, é predominantemente composta por sílica e alumínio, além de cálcio e magnésio. Contudo, o teor de manganês e ferro são substancialmente mais altos nas escórias BOF e EAF do que na escória de alto forno (PROCTOR *et al.*, 2000).

De acordo com Motz e Geiseles (2001), o teor de cálcio das escórias BOF e EAF está, em média, entre 42% e 55%. Esse conteúdo de óxido de cálcio presente nas escórias, somado com a percentagem de MgO, é o teor mais importante para a utilização da escória em fins de engenharia civil. Essas substâncias presentes no precursor ao entrarem em contato com um líquido podem causar um aumento de volume, geralmente ocorrendo uma desintegração das partículas da escória e perda da resistência. Contudo, esse efeito depende da porcentagem das substâncias presente. Esse problema com estabilidade dimensional pode ser solucionado com o incremento de outros materiais à reação, tais como as cinzas volantes e a escória de alto forno (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

Geralmente, a escória de aciaria é utilizada como agregado na construção civil, no entanto, é necessário que atenda as principais propriedades técnicas exigidas, como densidade, forma, resistência, entre outros (MOTZ; GEISELER, 2001). Pesquisas desenvolvidas na área, indicam a viabilidade do uso desse resíduo (ARRIBAS *et al.*, 2015; MANSO *et al.*, 2011; ORTEGA-LÓPEZ *et al.*, 2018; YANG *et al.*, 2018).

Entretanto, também há pesquisas com o desenvolvimento de cimentos álcali ativados com o uso de escória de aciaria. Destaca-se o trabalho de Cešnovar *et al.* (2019), que analisou a influência do tempo de cura nas propriedades mecânicas do material, misturando escória EAF e escória do tipo PANELA de diversas metalúrgicas situadas na região da Eslovênia, tendo como objetivo determinar o teor ótimo dessa mistura. A pesquisa de Liu *et al.* (2019) analisou a evolução em idades iniciais de materiais álcali ativados à base de escória de aciaria sob uma temperatura de 60 °C. Esse material foi produzido utilizando uma combinação de silicato de sódio e hidróxido de sódio como ativador. Somando-se aos anteriores, Aziz *et al.* (2017) investigou a influência do teor de escória de aciaria e escória de ferro níquel na resistência à compressão de materiais álcali ativados.

Esse tipo de precursor apresenta reação hidráulica, contudo, costuma levar um extenso período para obter um aglutinante endurecido (tendo como base a escória de alto forno). Portanto, se faz necessário o uso de um método alternativo para chegar ao endurecimento desejado. Uma opção à reação hidráulica é a álcali ativação, que tem como principal função acelerar a reação tornando o tempo, para formação de um material rígido, razoável (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

Wang, Scrivener e Pratt (1994) afirmam que o desempenho da reação depende da natureza e da concentração do ativador usado. De acordo com Fernández-Jiménez e Puertas

(2003), um bom ativador deve acelerar a solubilidade da escória, promover a formação de hidratos estáveis e formar uma estrutura de rede de hidratos.

Chao Li, Henghu Sun e Longtu Li (2010), afirmam que o componente químico das escórias de alto forno é constituído principalmente pelo sistema CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃, e uma estrutura vítrea é essencial para que ocorra a reatividade. Portanto, não há garantia que a estrutura vítrea produzirá uma escória com reatividade alta. Contudo, em materiais álcali ativados ou geopolímeros, o grau de despolimerização (GD) controla em grande parte as reações químicas e pode ser calculado pela seguinte fórmula (Equação 1):

$$GD = \frac{n(\text{CaO}) - 2n(\text{MgO}) - n(\text{Al}_2\text{O}_3) - n(\text{SO}_3)}{n(\text{SiO}_2) - 2n(\text{MgO}) - 0,5n(\text{Al}_2\text{O}_3)} \quad (1)$$

Para escórias de alto forno, o resultado da equação, geralmente, encontra-se entre 1,3-1,5. Altos valores indicam uma maior despolimerização, portanto, uma maior rede de silicato (LI, C.; SUN; LI, L., 2010).

Um estudo desenvolvido por Fernández-Jiménez e Puertas (2003), mostrou que o pH da solução ativadora exerce um papel muito importante na dissolução inicial dos precursores com alto teor de cálcio, transferindo íons Ca²⁺ da escória para a solução, gerando assim produtos de uma hidratação estável. Este processo é altamente favorecido para valores de pH iguais ou maiores que 12. Portanto se o ativador tiver valores de pH inferiores, o processo de ativação é atrasado.

2.1.2 Precursores com baixo teor de cálcio

Há diversos materiais que podem ser considerados como precursores com baixo teor de cálcio, tais como: metacaulim; cinzas vulcânicas e materiais pozolânicos naturais; feldspato e zeolitas naturais; cinzas volantes e cinzas pesadas (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014). Nesse trabalho, serão comentados apenas as cinzas volantes e cinzas pesadas.

As cinzas volantes são subprodutos obtidos a partir do carvão mineral, usados para geração de energia elétrica em usinas termelétricas (VARGAS *et al.*, 2007). Elas são removidas da combustão de gases, através de um sistema de coleta de poeira, sendo feito por meio mecânico ou através da utilização de precipitadores eletrostáticos (HARDJITO; RANGAN, 2005). Suas partículas apresentam uma forma esférica, tipicamente mais fina que o cimento

Portland e seu tamanho varia entre 1 μm e 150 μm . Sua composição química se dá principalmente por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de cálcio (CaO), além de conter, em menores proporções, óxido de magnésio, potássio, sódio, titânio e enxofre (HARDJITO; RANGAN, 2005; XIE; XI, 2001).

O tipo de carvão mineral usado pelas termelétricas, o método de combustão e a forma das partículas, interferem diretamente na composição química e nas características físicas das cinzas volantes. Sendo assim, as cinzas volantes derivadas de carvão betuminoso, que contém baixo teor de CaO , inferior a 10%, são conhecidas como cinzas volantes classe F (HARDJITO; RANGAN, 2005). De acordo com a Associação Americana de Cinzas de combustão de Carvão (*American Coal Ash Association – ACAA*) (2003), esse tipo de cinza volante, quando usado para substituir o cimento Portland, demonstra diversos benefícios, tais como:

- a) aumento da vida útil de estruturas de concreto, melhorando a sua durabilidade;
- b) impacto ambiental positivo, reduzindo o uso de energia e gases que provocam o efeito estufa, além de outras emissões atmosféricas adversas;
- c) redução da quantidade de produtos, derivados da combustão de carvão, que são descartados em aterros;
- d) conservação de outros recursos e materiais naturais.

A cinza pesada também pode ser considerada como precursor com baixo teor de cálcio. Assim como as cinzas volantes, é obtida através da combustão do carvão mineral em termelétricas, para a obtenção de energia elétrica. Durante décadas o uso desse resíduo foi considerado inviável. Contudo, as cinzas pesadas passaram a ser vistas na construção civil como um material alternativo sustentável, uma vez que diminui o volume de lixo residual e a emissão de gás carbono, quando usado como substituto ao cimento Portland ou como agregado (HASHEMI *et al.*, 2018).

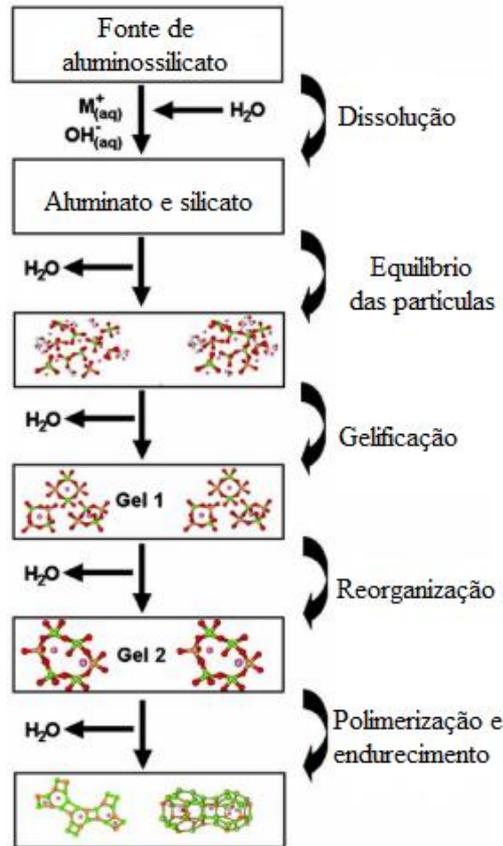
No decorrer dos anos, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas ao redor do mundo, associadas ao uso de precursores com baixo teor de cálcio, na maioria como um uso alternativo ao cimento Portland, causando um impacto ambiental positivo. Dentre esses trabalhos, pode-se citar como exemplo um estudo desenvolvido por Hardjito e Rangan (2005), que pesquisou o uso alternativo de concreto à base de cinza volante álcali ativada, tendo como foco principal a análise das propriedades mecânicas dos materiais e a produção do concreto alternativo. Hashemi *et al.* (2018) estudou as propriedades mecânicas de argamassas, utilizando

cinzas pesadas como precursor, e observou que o uso de um médio volume de material já causava grande diferença, gerando argamassas resistentes.

No Brasil, também há pesquisas voltadas para uso de materiais álcali ativados como alternativa na construção civil. Livi e Repette (2015), utilizando cinza volante álcali ativada com hidróxido de sódio, avaliaram o efeito de diferentes concentrações de solução, relações mássicas entre os materiais precursores e cura térmica na resistência à flexão e compressão. No estudo, concluiu-se que resultados potenciais de resistência podem ser encontrados quando se aumenta a concentração molar da solução e reduz-se a relação entre solução ativadora e cinza volante. No estudo de Vargas *et al.* (2015) foram utilizados cinza volante e metacaulim como precursores em argamassas álcali ativadas. Azevedo *et al.* (2017) produziram diversas amostras utilizando a cinza volante como precursor, com diferentes tipos de ativadores alcalinos, para observar como a composição química das soluções interferem nas propriedades finais da mistura. Finalmente, Boca Santa, Soares e Riella (2016) estudaram a mistura de dois precursores com baixo teor de cálcio, cinza pesada e metacaulim, para obter uma melhor caracterização de suas propriedades.

Em 1950, o cientista Glukhovsky propôs um mecanismo geral para a álcali ativação de materiais com baixo teor de cálcio. No decorrer dos anos, esse processo foi discutido e aprimorado por diversos cientistas da área. Inicialmente, o modelo proposto por Glukhovsky era dividido em três etapas: dissolução-gelificação, coagulação-condensação e condensação-cristalização. Após as adaptações feitas por Duxson, o processo passou a ter cinco etapas, que podem ser observadas na Figura 1, sendo elas: dissolução, equilíbrio das partículas, gelificação ou nucleação, reorganização e, por último, polimerização e enrijecimento (DUXSON *et al.*, 2007a).

Figura 1 - Mecanismo geral para álcali ativação



Fonte: Adaptado de Duxson (2007a)

Tomando como exemplo as cinzas volantes, quando ocorre a ativação alcalina desse precursor, resulta em uma pasta solidificada pela cura. Nesse processo as estruturas vítreas das cinzas são transformadas em cimento bem compactado (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO; CRIADO, 2005). O mecanismo de ativação se baseia na transformação de uma fonte sólida de aluminossilicato em um aluminossilicato ativado sintético. Essa dissolução deve ocorrer por uma hidrólise alcalina (DUXSON *et al.*, 2007a), e para que o silício e alumínio sejam dissolvidos, faz-se necessário que o ativador tenha uma alcalinidade elevada (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO; CRIADO, 2005; DUXON *et al.*, 2007a).

Livi (2013) cita que quando a dissolução de silício ocorre a uma velocidade indesejada, faz-se a incorporação de silicatos solúveis, fazendo com que aumente artificialmente sua concentração e disponibilidade. Assim tem-se um processo exotérmico, onde ocorre a dissolução de sólidos e a transferência dos componentes dissolvidos para uma fase em gel. Após esse processo tem-se uma reorganização, polimerização e por fim o enrijecimento.

Diferente do cimento Portland, no processo de álcali ativação de precursores com baixo teor de cálcio, a água não participa da formação de produtos hidratados, sendo assim a água é liberada e não consumida (HARDJITO; RANGAN, 2005). Pensando nisso, o controle da quantidade de água se faz necessário apenas para controlar o meio que ocorrerá o processo e para melhorar a trabalhabilidade (LIVI, 2013).

2.2 Ativadores

De acordo com Pinto (2006), a ativação alcalina é considerada como uma reação de hidratação de aluminossilicatos com um metal alcalino ou alcalino-terroso. Esses metais são chamados de ativadores químicos e classificados de acordo com a composição, como:

- a) álcalis cáusticos ou hidróxidos (ROH);
- b) sais não silicatos fracamente ácidos (R_2CO_3 , R_2SO_3 , R_3PO_4 , RF);
- c) silicatos ($R_2O.nSiO_2$);
- d) aluminatos ($R_2O.nAl_2O_3$);
- e) aluminossilicatos ($R_2O.Al_2O_3.(2-6)SiO_2$);
- f) sais não silicatos fortemente ácidos (R_2SO_4).

Onde a letra R representa os metais alcalinos ou alcalino-terroso (Na- Sódio, K- potássio, Li -Lítio, Ca-Cálcio). As soluções ativadoras mais utilizadas têm em sua composição química o sódio, podendo citar como exemplo o hidróxido de sódio (NaOH), silicato de sódio ($Na_2O.nSiO_2$), sulfato de sódio (Na_2SO_4) e o carbonato de sódio (Na_2CO_3). A escolha do ativador deve ser adequada, pois a natureza da solução pode influenciar em diversas propriedades do ligante, tais como a resistência (LIVI, 2013).

Em resumo, os ativadores usados para a ativação alcalina de materiais aluminossilicatos são, predominantemente, hidróxidos e silicatos com um alto valor de pH (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009). Outro parâmetro importante é a concentração molar da solução ativadora, quanto mais elevada, tende a causar uma forte aderência na fase de gelificação e uma melhor resistência mecânica final, contudo, deve-se buscar uma dosagem ótima, evitando assim uma perda de resistência causada pelo excesso do ativador (LIVI; REPETTE, 2015).

Para uma melhor compreensão do comportamento, das características químicas e das propriedades dos ativadores, alguns exemplos são aprofundados a seguir, dando ênfase no hidróxido de sódio e no silicato de sódio, já que são os ativadores utilizados nesse estudo.

2.2.1 Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio (NaOH) é o ativador à base de hidróxido mais utilizado em precursores como metacaulim e cinzas volantes. Isso é devido ao baixo custo, à ampla disponibilidade e à baixa viscosidade que ele apresenta (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009). A soda cáustica, como é conhecido o hidróxido de sódio comercialmente, trata-se de um sólido branco obtido através da eletrólise da salmoura, que é um processo definido como uma mudança química provocada pela aplicação de energia elétrica (LIVI, 2013).

O NaOH apresenta as seguintes características químicas: é higroscópico, inorgânico, massa molar de 40 g/mol e ponto de fusão à uma temperatura de 1390 °C. Quando ele está próximo a temperatura ambiente, apresenta um pH igual a 14 para uma concentração de 50 g/L, massa específica de 2,13 g/cm³ e coeficiente de solubilidade de 1090 g/L (IFA, 2012). Além disso, apresenta uma natureza corrosiva e, por isso, se fazem necessários equipamentos de processamento muito especializado, para assim produzir um alto volume de pastas cimentícias álcali ativadas (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

Em temperaturas elevadas, superiores a 322 °C, o hidróxido de sódio se torna completamente miscível em água, quando essa se encontra em sua forma líquida pura. Contudo, ele também é solúvel em água para temperaturas inferiores, quando tem uma alta concentração (PETRENKO; PITZER, 1997).

2.2.2 Silicato de sódio

O silicato é um produto obtido a partir da calcinação de um carbonato com uma fonte de sílica em uma temperatura entre 1400°C. Dentre os silicatos existentes, o mais utilizado é o silicato de sódio (Na₂SiO₃), isso se dá pelo seu simples processo de produção e por apresentar um baixo custo. Esse silicato é uma combinação de SiO₂, Na₂O e H₂O, onde a relação

entre $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ recebe o nome de módulo de sílica e pode variar conforme as características e propriedades desejáveis para o ativador (LONGHI, 2015).

O silicato de sódio é comercialmente vendido com uma alta taxa de pH e caracterizado pelo seu teor de SiO_2 . Ele é amplamente usado como uma fonte barata de sílica em diversas aplicações, tais como detergentes, adesivos, cimentos e revestimentos (NORDSTRÖM *et al.*, 2011).

Esse ativador é o mais utilizado para produção de escória de alto forno álcali ativada, isso ocorre porque existem diversas maneiras de manipular a composição de uma solução de silicato de sódio, e cada uma dessas formas causa um efeito diferente na estrutura ligante. O silicato de sódio é comumente incorporado a mistura como uma solução, isso é mais indicado, uma vez que, quando é incorporado como um sólido resulta em uma resistência inicial mais baixa e variável, e como consequência, o processo de álcali ativação se torna mais demorado (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

Esse ativador também pode ser incorporado a precursores com baixo teor de cálcio, formando uma estrutura semelhante quando se tem a aplicação de hidróxido de sódio ao mesmo precursor. A principal diferença observada em escala atômica é a proporção de Si/Al. Contudo, quando comparados os dois ativadores, observa-se que o silicato de sódio tende a conduzir uma resistência mais alta e uma menor porosidade do ligante (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

2.2.3 Outros ativadores

Além dos já citados, outros ativadores são comercializados e podem ser usados para álcali ativação. Contudo, tem uso pouco comum por conta dos custos mais elevados, quando comparado aos ativadores já mencionados, e da complexidade para utilização. Alguns materiais que podem ser citados como exemplo de ativadores são o carbonato de sódio, o hidróxido de potássio e o silicato de potássio. Esse último é semelhante ao silicato de sódio, apresentando algumas características parecidas. Ao longo das últimas décadas, alguns pesquisadores estão desenvolvendo estudos sobre o uso de soluções à base de carbono como solução ativadora. Boa parte dessas pesquisas são voltadas para o uso em ativação de materiais com alto teor de cálcio, como as escórias (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

O carbonato de sódio (Na_2CO_3), utilizado como ativador de escória de alto forno, apresenta uma resistência mecânica mais elevada quando comparado ao uso do hidróxido de sódio, porém apresenta menor valor se comparado ao uso do silicato de sódio (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

O hidróxido de potássio, comercialmente conhecido como potassa cáustica, é classificado como uma base forte, apresentando a fórmula molecular KOH. Em temperatura ambiente, apresenta uma forma sólida em tom branco cristalino, é bastante higroscópico, tem ponto de fusão igual a $360\text{ }^\circ\text{C}$ e é solúvel em água. O KOH pode ser preparado de diversas formas. Porém o método mais comum é pela eletrólise do cloreto de potássio, processo semelhante a obtenção do hidróxido de sódio (FERREIRA, 2019). O uso de potássio em materiais álcali ativados à base de metacaulim afeta de forma positiva as propriedades mecânicas da pasta, contudo a sua cristalização é mais demorada, quando comparada ao uso de hidróxido de sódio ao mesmo precursor (DUXSON *et al.*, 2007b).

2.3 Propriedades dos cimentos álcali ativados

Para o uso de qualquer material como substituto do cimento Portland, é necessário que ele atenda requisitos técnicos, levados em consideração para aplicação na construção civil. Entre as principais propriedades exigidas, destaca-se a boa resistência mecânica, grande durabilidade, baixa permeabilidade, tempo de cura eficaz, resistência à tração e trabalhabilidade.

Dependendo da matéria-prima e processos adotados, os materiais álcali ativados podem apresentar uma variedade de propriedades e características, incluindo uma alta resistência à compressão, resistência à ataques ácidos, resistência ao fogo e boa trabalhabilidade (DUXSON *et al.*, 2007a). Essas propriedades podem ser divididas em propriedade no estado fresco e propriedades no estado endurecido.

2.3.1 Propriedades no estado fresco

A trabalhabilidade, propriedade importante para o manuseio e aplicação de materiais cimentícios, é frequentemente avaliada pelo escoamento. Em argamassas, geralmente, é determinado pelo ensaio de mesa de consistência (flow table test) e em concretos pelo ensaio de abatimento de tronco de cone (slump test). Alguns fatores influenciam negativamente a trabalhabilidade, como o aumento da relação cinza volante/ativador, assim como, o aumento da relação $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$. Sendo assim, a fluidez e a trabalhabilidade de materiais álcali ativados aumentam quando a concentração de NaOH diminui (ZHANG *et al.*, 2018).

Outra propriedade importante para manuseio e execução de materiais cimentícios é o tempo de pega. Esse período deve abranger a fabricação, o transporte e a aplicação da argamassa ou concreto é definida como a propriedade que define o período em que o material leva para atingir determinada consistência e permite que seja determinado o tempo necessário para transportar, moldar e compactar a pasta (ZHANG *et al.*, 2018).

O tempo de pega para o cimento Portland é dividido em inicial e final, e pode ser medido através do uso do aparelho de Vicat. De acordo com a ABNT NBR 16607 (2018), o tempo de pega inicial é caracterizado pelo intervalo de tempo, desde a fabricação da pasta, que a agulha de Vicat leva para penetrar a pasta e estacionar a uma distância (6 ± 2 mm) da placa base. Já o tempo de fim de pega é dito como o intervalo de tempo, desde a fabricação da pasta, que a agulha de Vicat leva para penetrar 0,5 mm na pasta.

Em geral, o tempo de pega de compósitos à base de cimento Portland é mais demorado do que o tempo de pega de compósitos à base de materiais álcali ativados (ZHANG *et al.*, 2018). Manso *et al.* (2011) desenvolveu uma pesquisa na qual pôde-se observar um rápido endurecimento do concreto à base de escórias siderúrgicas, fazendo com que o concreto endurecesse ainda na betoneira, tornando impossível que uma mistura satisfatória ocorresse. Contudo, de acordo com Yang *et al.* (2018), o tempo inicial de pega pode ser aumentado quando se é incorporado escória de aciaria a mistura. Ele chegou a esse resultado estudando o incremento de diferentes percentuais de escória em pastas de cimento de fosfato de magnésio e potássio.

Por outro lado, um estudo de Leonard Wijaya, Jaya Ekaputri e Triwulan (2017) avaliou os fatores que influenciavam no tempo de pega das cinzas volantes, verificando que o tipo de cinza utilizado interfere diretamente no resultado, podendo chegar em um tempo inicial

de pega de até 5 horas e 50 minutos. Além disso há diversos outros fatores que influenciam no tempo de pega de pastas álcali ativadas, como o teor de cálcio presente em cinzas volantes (WIJAYA; EKAPUTRI; TRIWULAN, 2017; ZHANG *et al.*, 2018), a relação $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ e a relação cinza volante/ativador.

O aumento da molaridade de NaOH pode diminuir o tempo de pega inicial e final da argamassa ou concreto à base de materiais álcali ativados, isso ocorre devido a interferência na relação de Na e Si pelo o aumento de sua concentração (ZHANG *et al.*, 2018). Além disso, o tipo de ativador usado para produção do material interfere diretamente no tempo de pega, sendo verificados em estudos que argamassas constituídas apenas de hidróxido de sódio, como ativador, obtém um tempo de pega maior do que aquelas que utilizam o hidróxido de sódio incrementado com silicato de sódio (MUSADDIQ LASKAR; TALUKDAR, 2017).

Como ainda não há um consenso entre os pesquisadores, ainda tem-se buscado o desenvolvimento de estudos que possam caracterizar de maneira precisa o tempo de pega de cimentos álcali ativados.

2.3.2 Propriedades no estado endurecido

Uma das propriedades mais importantes para o uso de qualquer substância na construção civil é a resistência à compressão. E assim como o cimento comum, o uso de materiais álcali ativados para a produção de argamassas e concretos, apresenta uma boa resistência à compressão (ZHANG *et al.*, 2018).

Essa propriedade é influenciada por diferentes fatores, tais como o tipo e a concentração do ativador usado, sendo o uso de silicato de sódio mais eficiente pois gera um aumento na resistência à compressão final (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009). Contudo, o aumento de concentração de NaOH em pastas à base de metacaulim, faz com que a resistência à compressão tenha valores maiores, quando o período de cura for superior a 7 dias (VASCONCELOS *et al.*, 2011). Também há fatores que diminuem essa resistência, tais como a presença de caulinita, que diminui a resistência em até 60%, e a adição de CaO (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

Os materiais álcali ativados produzidos a partir de cinzas volantes e de ativadores com razão de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ próximo de 1, apresentam uma ótima resistência à compressão, além

de uma baixa permeabilidade e uma elevada resistência mecânica. Esses resultados obtidos para essas propriedades dependem, principalmente, de uma fonte extra de SiO₂ (AZEVEDO *et al.*, 2017).

Assim como em argamassas e concretos tradicionais à base de cimento Portland, os materiais álcali ativados também tem baixa resistência à tração. Um dos fatores que influencia em uma maior resistência à tração é a incorporação de escória de alto forno em argamassas e concretos, além disso o uso de hidróxido de sódio proporciona resultados maiores para essa propriedade. Um outro fator que influencia significativamente na resistência à tração é a temperatura de cura do compósito (ZHANG *et al.*, 2018).

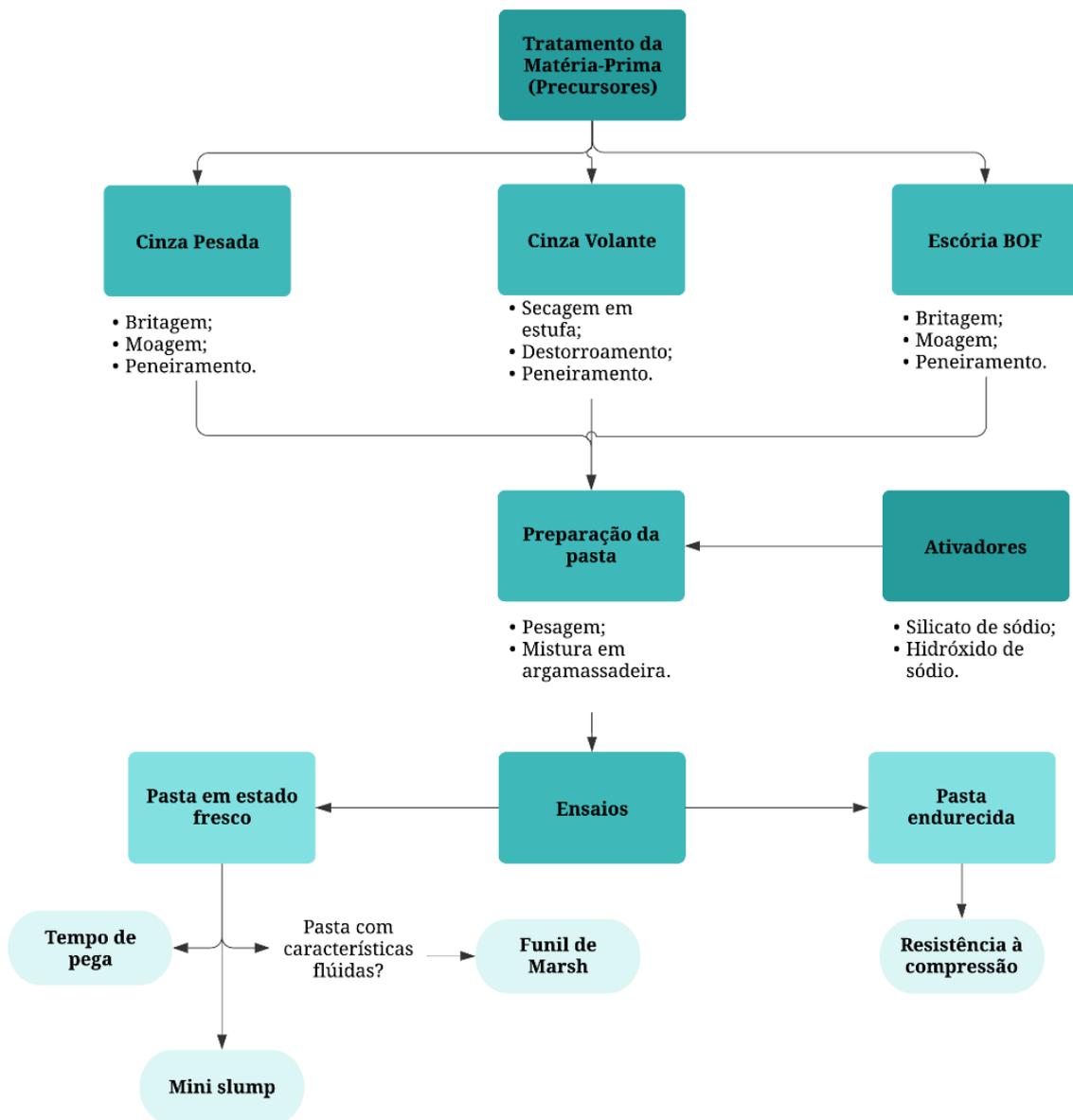
Diversas propriedades podem sofrer influências diretas pela exposição em altas temperaturas (KUENZEL *et al.*, 2013; PAN; SANJAYAN; RANGAN, 2009; RANJBAR *et al.*, 2014). Além disso, há diversos fatores que afetam a resistência à altas temperaturas, podendo citar o tipo de ativador usado para fabricação do material álcali ativado. Um estudo mostrou que o uso de hidróxido de sódio é menos eficaz quando comparado ao silicato de sódio, que obteve uma maior resistência à altas temperaturas nessa condição (ERDOGAN, 2015).

A resistência à ataques químicos é influenciada diretamente pela temperatura de cura a qual o material foi submetido. Djobo *et al.* (2016) utilizou cinzas vulcânicas para fabricação de argamassas e verificou que quando o material era submetido a uma temperatura de cura de 27° C, o resultado da resistência ao ataque do ácido sulfúrico era maior do que quando a cura foi feita com 80° C. Um outro fator que interfere no resultado dessa propriedade é o tipo de ativador utilizado na solução, sendo o uso de hidróxido de sódio mais eficaz, quando comparado ao uso de silicato de sódio, uma vez que, argamassas contendo NaOH submetidas ao ataque de ácido sulfúrico apresentaram resultados melhores (ERDOGAN, 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho é classificado como uma pesquisa explicativa, quantitativa e experimental (THESAURUS, 2016). Os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Ceará – campus do Pici. A sequência de execução do tratamento da matéria-prima, preparação da pasta, ensaios de caracterização e determinação das propriedades das pastas cimentícias serão apresentadas nos tópicos a seguir e estão resumidas no fluxograma da Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma de procedimentos experimentais



Fonte: Elaborada pelo autor

3.1 Materiais

3.1.1 Precursores

Neste trabalho, a cinza volante, a cinza pesada e a escória de aciaria BOF são utilizados como precursores. Esses materiais são oriundos de resíduos industriais gerados na Zona Industrial e Portuária do Pecém-Ce.

A escória de aciaria utilizada na pesquisa é do tipo BOF (Basic Oxygen Furnace) classificada como resíduo siderúrgico e adquirida na Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP). Enquanto, a cinza volante e a cinza pesada utilizadas são oriundas da usina termelétrica do Pecém (EDP). Ambos os precursores foram caracterizados quanto a composição química, a massa específica, granulometria e área de superfície específica. Nobre *et al.* (2017) e Costa (2021) fizeram uma caracterização da composição química destes precursores, através de uma análise de fluorescência de raio X (FRX) realizada no laboratório de Raio-X do departamento de física da Universidade Federal do Ceará (UFC) e pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química dos precursores

Componentes	% de óxidos		
	Cinza Volante	Cinza Pesada	Escória de aciaria
SiO ₂	41,49	50,66	6,40
Al ₂ O ₃	14,49	10,66	1,80
CaO	9,54	5,61	52,00
Fe ₂ O ₃	24,95	26,99	34,30
K ₂ O	4,54	3,68	0,20
MnO	0,17	0,14	3,30
Rb ₂ O	-	0,06	-
SO ₃	0,29	-	0,50
P ₂ O ₃	0,44	-	-
P ₂ O ₅	-	-	0,50
TiO ₂	3,26	-	-
CuO	0,11	-	-
ZnO	0,14	-	0,20
MgO	-	-	0,70
SrO	0,55	0,43	0,10

Fonte: Costa (2021) e Nobre *et al.* (2017)

Antes da utilização, a cinza volante foi seca em estufa à 110°C por 24 horas, para retirar a umidade. Após seca, o precursor foi destorroado e peneirado, em peneira de nº 100 (150 µm).

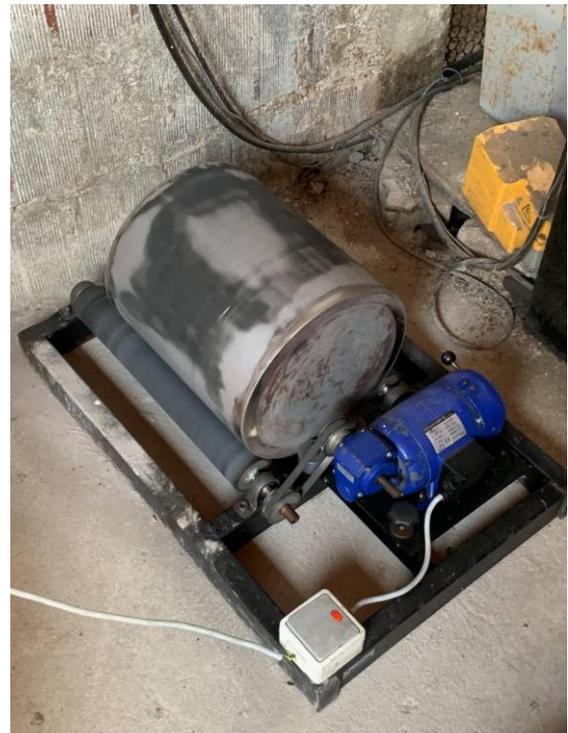
A cinza pesada e a escória BOF passaram por um tratamento diferente da cinza volante, que consiste em uma adequação granulométrica. Inicialmente esses precursores foram cominuídos em aparelho de abrasão Los Angeles, conforme visto na Figura 3. Nessa etapa o precursor obtém uma característica granulométrica semelhante a de uma areia média. Após esse processo, a cinza pesada e a escória de aciaria passaram por uma moagem, em um moinho de bolas (Figura 4). Cada um dos materiais deve passar uma quantidade de tempo necessária para que o rendimento seja adequado. Por conta desse tratamento preliminar dos precursores, as características dos materiais podem ser diferentes, se tornando materiais mais finos com partículas menores.

Figura 3 - Aparelho de abrasão Los Angeles



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4 - Moinho de bolas

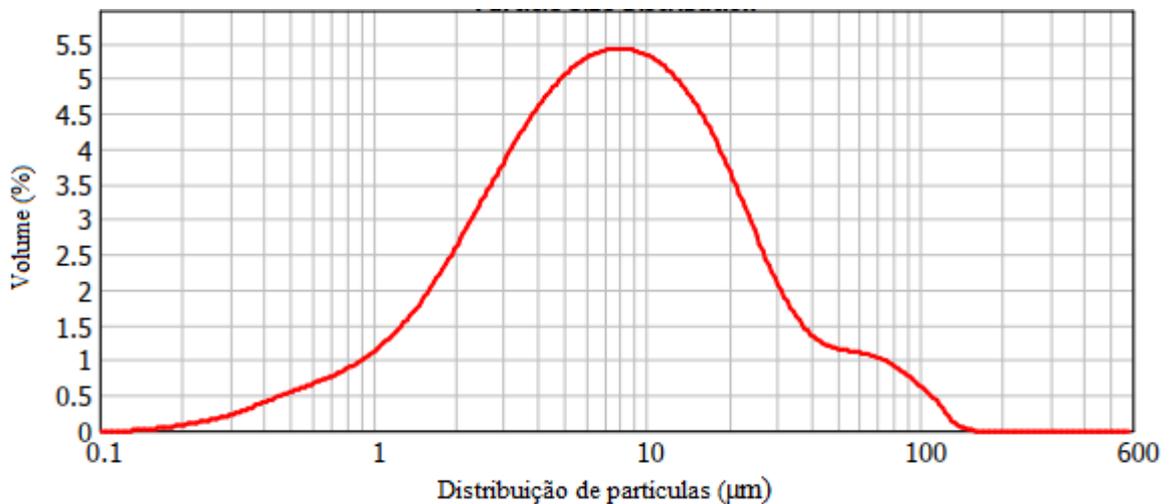


Fonte: Elaborada pelo autor

A cinza pesada passou em torno de 4 horas no moinho, enquanto, a escória do tipo BOF passou em torno de 7 horas, por ser um material mais rígido. Para finalizar a preparação inicial, assim como nas cinzas volantes, os demais precursores passam por peneiramento em peneira de n° 100.

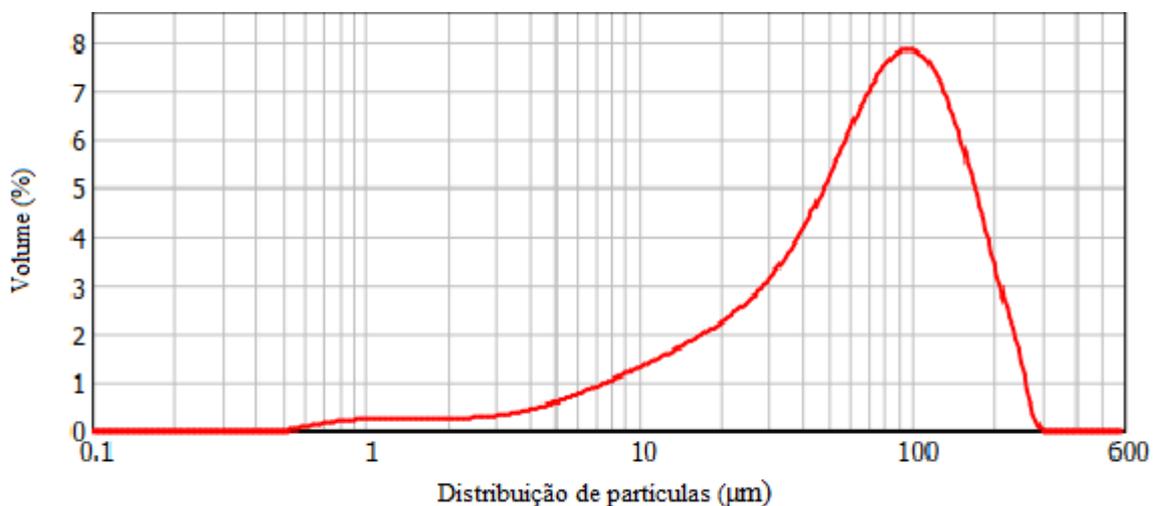
A distribuição granulométrica dos precursores foi obtida por meio da técnica de difração a laser no laboratório de artefatos de cimento da fábrica de cimento Apodi, unidade de Quixeré-CE. As Figuras 5, 6 e 7, representam, respectivamente, a distribuição granulométrica da cinza volante, da cinza pesada e da escória BOF (COSTA, 2021).

Figura 5 – Distribuição granulométrica da cinza volante



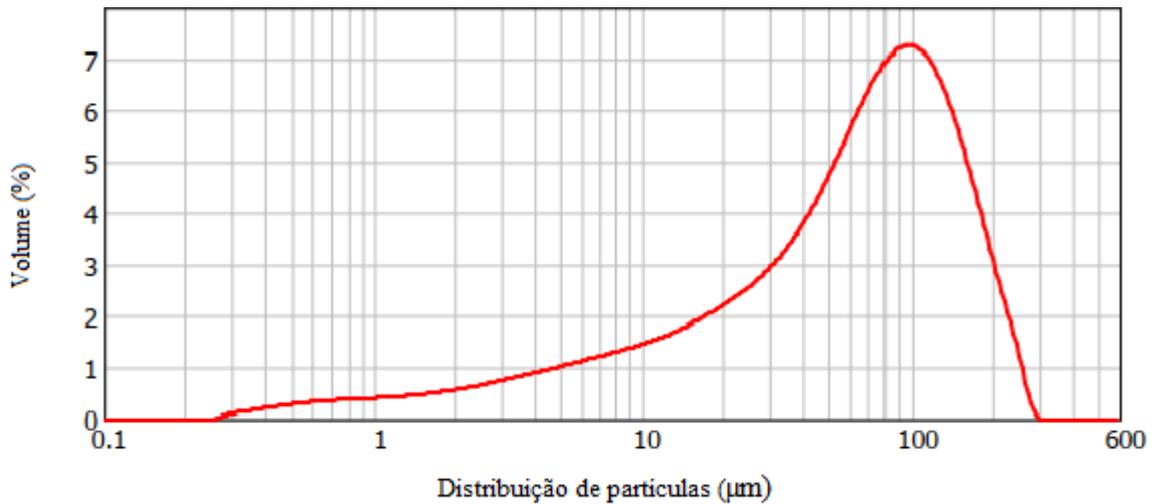
Fonte: Costa (2021)

Figura 6 – Distribuição granulométrica da cinza pesada



Fonte: Costa (2021)

Figura 7 – Distribuição granulométrica da escória BOF



Fonte: Costa (2021)

A área de superfície específica também foi obtida na difração a laser, conforme disposto na Tabela 2. Assim como, os percentuais de partículas por dimensão. A massa específica foi obtida conforme ABNT NBR NM 53 (2009) no Laboratório de Materiais da Construção Civil da UFC, no campus do Pici, como visto na Tabela 2.

Tabela 2 – Distribuição granulométrica dos precursores

Característica	Diâmetro (%)	Partícula (µm)		
		Cinza Volante	Cinza Pesada	Escória de Aciaria
Distribuição granulométrica	D10%	1,612 µm	12,489 µm	5,779 µm
	D50%	7,376 µm	70,393 µm	63,376 µm
	D90%	30,506 µm	164,203 µm	158,993 µm
	Dmédio	13,164 µm	82,361 µm	76,049 µm
Área de superfície específica		17300 cm ² /g	2750 cm ² /g	5710 cm ² /g
Massa Específica (NBR 16605:17)		2,18 g/cm ³	1,52 g/cm ³	2,92 g/cm ³

Fonte: Costa (2021)

3.1.2 Ativadores

Foram dois os ativadores utilizados no estudo, sendo estes o hidróxido de sódio e o silicato de sódio, comercializados pelas marcas NOX e Kalim, respectivamente. O NaOH contém micropérolas com 97% de pureza e sua caracterização pode ser encontrada na Tabela 3, dividida em três concentrações diferentes do ativador. Já na Tabela 4, podemos encontrar a caracterização do silicato de sódio.

Tabela 3 - Caracterização das soluções de hidróxido de sódio

Parâmetros	8 mol/l	10 mol/l	16 mol/l
Sólidos Totais -Na ₂ O (%)	25,2	30,5	45,5
H ₂ O (%)	74,8	69,5	54,5
Relação H ₂ O / Na ₂ O	2,99	2,27	1,19
Massa Específica (g/cm ³)	1,27	1,30	1,41

Fonte: Costa (2021)

A Tabela 4 mostra a caracterização do silicato de sódio.

Tabela 4 - Caracterização do silicato de sódio

Parâmetros	Resultados
Na ₂ O (%)	15,08
SiO ₂ (%)	32,69
Sólidos Totais (%)	47,77
Relação SiO ₂ / Na ₂ O (módulo de sílica)	2,17
Massa Específica (g/cm ³)	1,57
Viscosidade (cp)	1,074

Fonte: Fabricante (2019)

3.2 Métodos de pesquisa

3.2.1 Mistura e preparação das pastas

A relação entre silicato de sódio e hidróxido de sódio foi igual a 1 e o consumo de ligante igual a 450 kg/m³ para todas as pastas. No entanto, a concentração molar do hidróxido

de sódio (M_{NaOH}) e a relação entre solução ativadora e ligante (S/L) foram determinadas com base no estudo de Costa (2021), que obteve as Equações 2, 3 e 4 para prever a resistência à compressão em sistemas unitários para cada um dos precursores aqui estudados.

$$R_{Vol.} = 1460 - 273,6x + 11,8x^2 - 4797y + 3724,7y^2 + 912,3xy - 714,4xy^2 - 39,3x^2y + 30,8x^2y^2 \quad (2)$$

$$R_{Pes.} = -180,2 + 12,3x - 0,17x^2 + 639,9y - 473,7y^2 - 42,9xy + 30,5xy^2 + 0,5x^2y - 0,4x^2y^2 \quad (3)$$

$$R_{BOF} = 274,4 - 48,9x + 2,2x^2 - 729,3y + 510y^2 + 139,7xy - 101,4xy^2 - 6,4x^2y + 4,6x^2y^2 \quad (4)$$

Em que:

R_{vol} = Previsão da resistência à compressão aos 28 dias para as pastas de cinza volante (MPa);

R_{Pes} = Previsão da resistência à compressão aos 28 dias para as pastas de cinza pesada (MPa);

R_{BOF} = Previsão da resistência à compressão aos 28 dias para as pastas de escória BOF (MPa);

X = Concentração Molar- M_{NaOH} (mol/l);

Y = Relação solução ativadora alcalina/ligante -S/L.

Após a preparação dos materiais, iniciou-se a confecção das pastas, tendo como base os modelos acima. Os valores de M_{NaOH} e da relação S/L, para as misturas binárias cinza volante/pesada e BOF/cinza pesada, são valores intermediários que contemplam bons resultados para ambos os precursores. Para os binários cinza volante/BOF, selecionou-se os valores máximos, visto que foram coincidentes na aplicação do modelo. Ao todo, foram confeccionadas 15 pastas, seguindo os parâmetros observados da Tabela 5.

Tabela 5 - Matriz experimental dos cimentos binários

	Pasta	Volante (%)	Pesada (%)	BOF (%)	Razão S/L	M _{NaOH}
Cinza volante/ pesada	VP100/0	100	0	0	0,6	10 mol/l
	VP75/25	75	25	0	0,6	10 mol/l
	VP50/50	50	50	0	0,6	10 mol/l
	VP25/75	25	75	0	0,6	10 mol/l
	VP0/100	0	100	0	0,6	10 mol/l
Cinza volante/BOF	VB100/0	100	0	0	0,5	16 mol/l
	VB75/25	75	0	25	0,5	16 mol/l
	VB50/50	50	0	50	0,5	16 mol/l
	VB25/75	25	0	75	0,5	16 mol/l
	VB0/100	0	0	100	0,5	16 mol/l
Cinza pesada/BOF	PB100/0	0	100	0	0,6	8 mol/l
	PB75/25	0	75	25	0,6	8 mol/l
	PB50/50	0	50	50	0,6	8 mol/l
	PB25/75	0	25	75	0,6	8 mol/l
	PB0/100	0	0	100	0,6	8 mol/l

Fonte: Costa (2021)

Como pode ser observado na Tabela 5, a composição das pastas foi tida como um parâmetro variável. Por outro lado, a relação ativador/ligante e a concentração molar do ativador são mantidas fixas em cada sistema, contudo, são variáveis entre sistemas.

O preparo dos ativadores nos sistemas binários cinza volante/cinza pesada e cinza pesada/BOF, consiste em misturar a solução com hidróxido de sódio e silicato de sódio 24 horas antes da confecção da pasta, para que assim ocorra a dissipação do calor gerado no processo de preparação do ativador. Já para o sistema binário cinza volante/ BOF, o silicato de sódio e hidróxido de sódio, foram misturados dentro da argamassadeira, junto com os precursores, a fim de evitar possíveis reações químicas entre os ativadores devido à alta molaridade do hidróxido de sódio nesse sistema.

Para a confecção da pasta utilizou-se uma argamassadeira planetária. Primeiro realizando uma pré-homogeneização manual durante 01 minuto, evitando assim, espalhar respingos da solução ativadora, que podem causar queimaduras na pele do operador. Na

sequência, utilizou-se o misturador planetário durante 01 minuto, realizando uma pausa de 01 minuto para retirar material das paredes do recipiente com o auxílio de uma espátula. Por fim, conclui-se a mistura mecânica por mais 02 minutos. A argamassadeira planetária durante o processo de mistura pode ser observada na Figura 8.

Figura 8 - Mistura da pasta em argamassadeira planetária



Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.2 Ensaios realizados

Logo após a mistura, os ensaios de caracterização no estado fresco foram realizados, sendo eles: Mini slump; Índice de fluidez e Tempos de pega. No estado endurecido, foi realizado o ensaio de resistência à compressão em 7 e 28 dias.

3.2.2.1 Mini slump

O primeiro ensaio executado foi o Mini slump ou mini abatimento (KANTRO,1980), que consiste no preenchimento de um mini cone, com dimensões proporcionais ao cone de Abrams original, cujo diâmetro no topo é igual a 19 mm, um diâmetro

no meio igual a 38 mm e um diâmetro na sua base de 57 mm, o aparelho pode ser observado na Figura 9.

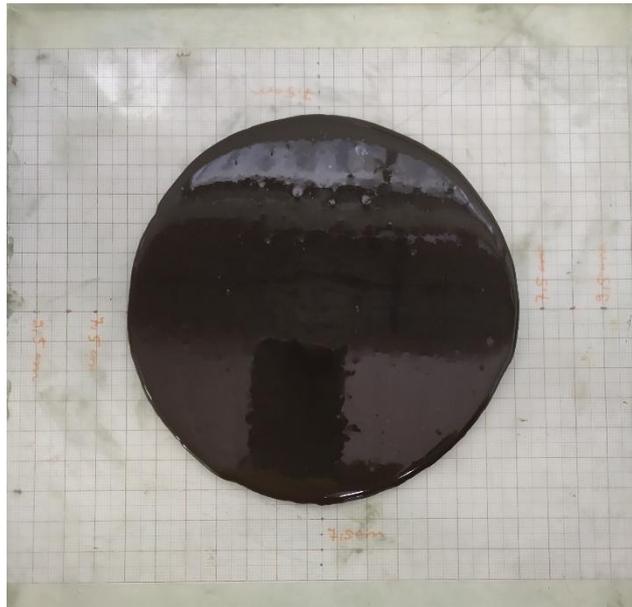
Figura 9 – Mini cone



Fonte: Elaborada pelo autor

Inicialmente, o mini cone deve ser posicionado em cima de uma placa de vidro e logo após preenchido com a pasta. Em seguida, o cone deve ser retirado de forma rápida e verticalmente para que a pasta possa escorrer, de forma que fique semelhante a Figura 10. Com o auxílio de um papel milimetrado e de um paquímetro, deve-se realizar a medição de três diâmetros em milímetros. A média dessas três dimensões será o resultado do mini slump (WEDDING; KANTRO, 1980). Esse ensaio se difere para pastas com comportamento plástico, onde devem ser aplicados 5 golpes com uma haste de vidro na pasta após o preenchimento do mini cone, conforme recomendação de Raucci (RAUCCI *et al.*, 2018).

Figura 10 – Espalhamento da pasta no Mini slump



Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.2.2 Índice de fluidez

A determinação do índice de fluidez com o funil de Marsh baseou-se na parte 2 da ABNT NBR 7681 (2013) e no trabalho de Christiane Menezes (2006), que indica o volume necessário para o escoamento da pasta entre 200 cm³ e 1000 cm³. Nesse sentido, realizou-se o preenchimento do funil com volume de 1000 cm³ de pasta, em seguida realizou-se a medição do tempo, em segundos, que 800 cm³ de calda leva para escoar pelo o funil de Marsh. Sendo assim, para determinar o índice de fluidez deve-se, primeiramente, umedecer as paredes internas do funil, posicionar uma proveta embaixo do mesmo, obstruir manualmente o bico do funil e então preenchê-lo com um volume igual a 1000 cm³. Em seguida, o escoamento deve ser liberado e um cronômetro acionado até que a pasta atinja um volume igual a 800 cm³ na proveta. A aparelhagem pode ser observada na Figura 11.

Figura 11 - Funil de Marsh



Fonte: Elaborada pelo autor

Devido à grande quantidade de material necessário para a execução deste ensaio, não foi possível realizá-lo no sistema cinza volante/escória BOF, uma vez que, nas primeiras tentativas do programa experimental houve perda de material. A aquisição das matérias-primas era inviável, devido às restrições impostas pela pandemia da COVID-19, como lockdown decretado no estado, no período de execução da pesquisa (abril/2021). Dessa forma, esse ensaio não foi priorizado para o sistema mencionado.

3.2.2.3 Tempo de pega

Em cada pasta, foram realizados os ensaios de início e fim de pega. Para determinação dos tempos de pega seguiu-se as especificações da ABNT NBR 16607 (2018), com o uso do aparelho de Vicat com a agulha correspondente ao tempo de pega que se pretende determinar. Para isso utilizou-se dois aparelhos de Vicat, um para determinação do tempo de

início de pega e outro para determinação do tempo de fim de pega, de modo a facilitar a realização dos ensaios. Toda a aparelhagem utilizada para esse ensaio pode ser encontrada na Figura 12.

Figura 12 - Aparelhagem do ensaio de tempo de pega



Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.2.4 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada tomando como modelo a ABNT NBR 16738 (2019), utilizando moldes cúbicos com 4 cm de lado para confeccionar os corpos de prova, como é mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Corpos de prova do ensaio de resistência à compressão



Fonte: Elaborada pelo autor

A pasta teve cura em temperatura ambiente e a ruptura foi feita com 7 e 28 dias. Após o desmolde dos corpos de prova, eles foram estocados, etiquetados e lacrados em sacos plásticos para evitar possíveis perdas excessiva de umidade, e consequentemente retração por secagem. Essa condição de cura pode ser mais bem observada na Figura 14.

Figura 14 - Condição de cura



Fonte: Elaborada pelo autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussão foram divididos em tópicos por sistemas binários para facilitar a compreensão do leitor e a comparação entre os resultados de cada sistema. Inicialmente será apresentado o sistema composto apenas por cinzas do carvão mineral (cinza volante e cinza pesada), em seguida, serão apresentados os sistemas compostos por cinzas e escória de aciaria BOF.

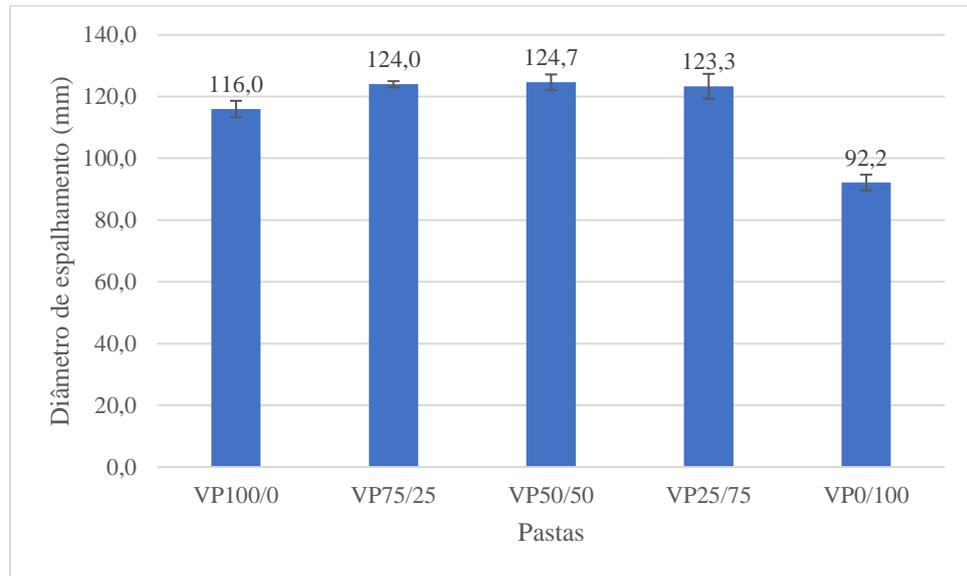
4.1 Sistema cinza volante e cinza pesada

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos nos ensaios executados no sistema binário composto por cinza volante e cinza pesada, esse sistema recebeu a denominação VP. Os resultados foram divididos em dois tópicos, o primeiro refere-se aos resultados dos ensaios executados ainda no estado fresco da pasta, já o segundo tópico está relacionado com a resistência à compressão aos 7 e 28 dias, após o endurecimento da pasta.

4.1.1 Resultados dos ensaios em estado fresco

Os resultados do mini slump para o sistema VP podem ser observados no gráfico da Figura 15, eles foram obtidos por meio da média entre a medida de três diâmetros após o escoamento da pasta (WEDDING; KANTRO, 1980), no gráfico também pode ser observado o desvio padrão de cada resultado.

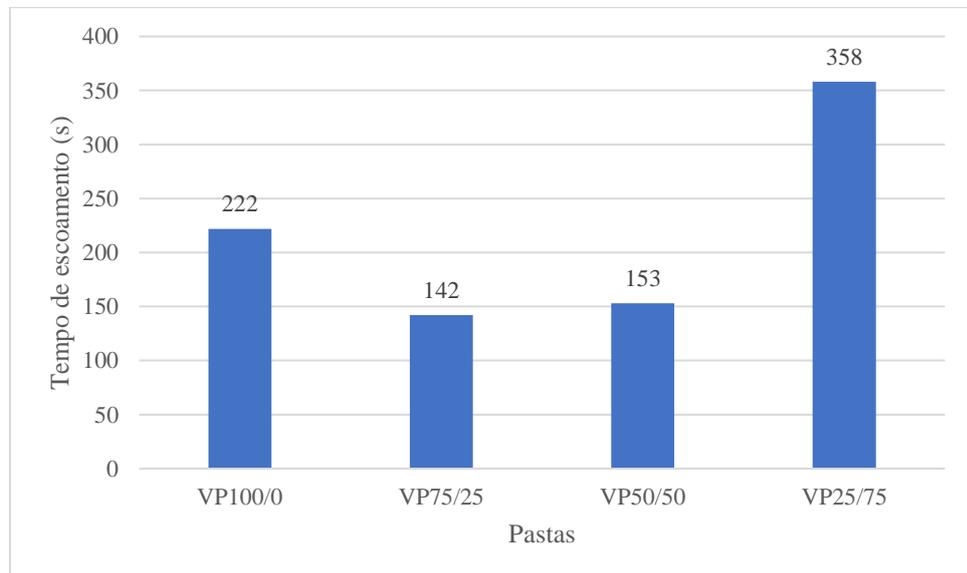
Figura 15 - Mini slump do sistema VP



Fonte: Elaborada pelo autor

O índice fluidez foi executado apenas em pastas que apresentavam características fluidas e seus resultados podem ser observados no gráfico da Figura 16.

Figura 16 - Índice de fluidez do sistema VP



Fonte: Elaborada pelo autor

A pasta com 100% de cinza pesada (VP 0/100) não é apresentada no gráfico de índice de fluidez, uma vez que apresentou características plásticas, impossibilitando a execução do ensaio pelo funil de Marsh. Esse estado plástico justifica o pequeno diâmetro de espalhamento medido no ensaio de mini slump, conforme Figura 17.

Figura 17 - Espalhamento da pasta VP 0/100



Fonte: Elaborada pelo autor

Através dos resultados apresentados nos gráficos das Figuras 15 e 16, pode-se observar que maior porcentagem de cinza pesada no sistema VP, faz com que as pastas se tornem menos fluidas. Com exceção da pasta VP 100/0, que não teve um bom resultado de trabalhabilidade quando comparado aos demais. Com isso, as pastas consideradas com melhor trabalhabilidade são as pastas VP 75/25 e VP 50/50, pois apresentaram os maiores diâmetros de espalhamento no mini slump e os menores tempos de escoamento no funil de Marsh. Sendo assim, quando comparadas com as demais pastas do sistema VP, elas apresentaram características mais fluidas, sendo melhores de manusear.

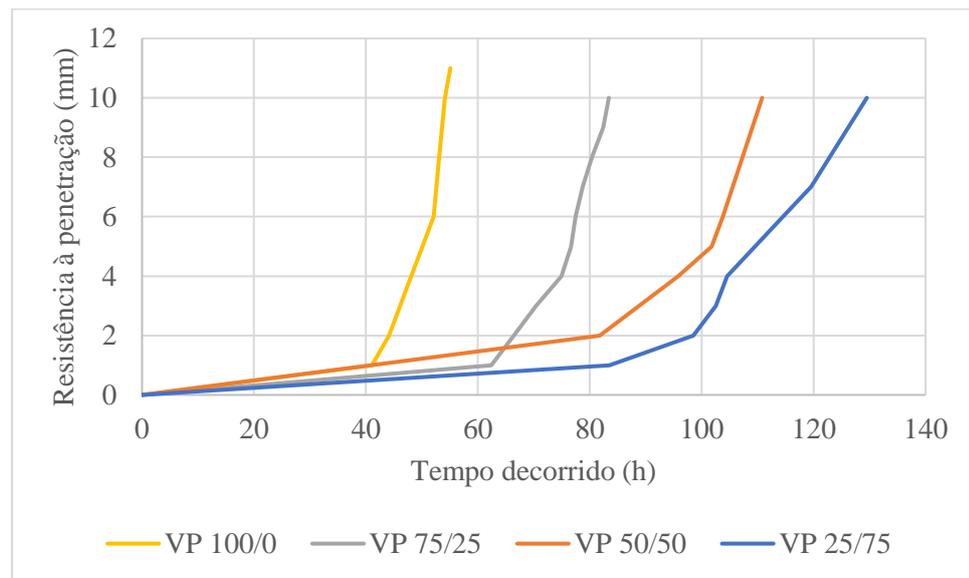
A cinza volante utilizada é composta por partículas finas, de forma esférica e tamanho em torno de $13,164 \mu\text{m}$ e sua área de superfície específica é equivalente a $17.300 \text{ cm}^2/\text{g}$, como pode ser observado na Tabela 2. A elevada área de superfície específica de um material, faz com que se necessite de uma maior quantidade de solução para envolver as partículas (CAMPOS *et al.*, 2019), justificando o índice de fluidez da pasta VP 100/0. Para as pastas VP 75/25 e VP 50/50, esse índice de fluidez pode ter ocorrido pelo melhor empacotamento dos grãos. Esse empacotamento ocorre por conta da diferença do tamanho das partículas de cinza volante e cinza pesada, que pode ser observado na Tabela 2, tornando a pasta mais trabalhável por um período maior (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2009).

Por outro lado, a cinza pesada apresenta uma área de superfície específica igual a $2750 \text{ cm}^2/\text{g}$, e quando comparada com a cinza volante, apresenta um tamanho relativamente

maior, sendo cerca de 82,361 μm . Conforme a literatura, as partículas de cinza pesada são irregulares e porosas (LONGHI, 2015), essas características fazem com que as partículas absorvam o líquido da pasta fresca, diminuindo assim a sua trabalhabilidade (SATHONSAOWAPHAK; CHINDAPRASIRT; PIMRAKSA, 2009).

O tempo de pega inicial foi determinado de acordo com os parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 16607 (2018), onde a mesma define o início de pega como o intervalo de tempo em que a agulha do aparelho de Vicat penetra na pasta e estaciona a uma distância de (6 ± 2) mm da placa base. Neste trabalho, também foi realizado o acompanhamento da evolução (dificuldade) da penetração da agulha no decorrer do tempo, portanto, sendo denominada de “resistência à penetração”. Nesse sentido, o resultado do ensaio de tempo de pega para as pastas do sistema VP pode ser observado no gráfico da Figura 18.

Figura 18 - Tempo de pega inicial do sistema VP



Fonte: Elaborada pelo autor

A pasta que utiliza como precursor a proporção de 100% cinza pesada (VP 0/100) não apresentou início de pega dentro de 100 horas de observação, podendo ser verificada na Figura 19, por esta razão não é vista no gráfico da Figura 18.

Figura 19 - Pasta VP 0/100 após decorridas 100 horas



Fonte: Elaborada pelo autor

A pasta VP 0/100 não obteve pega, portanto, por ser um precursor com 100% de cinza pesada, é possível realizar a cura térmica para que assim possa ser realizada a análise da resistência à compressão da pasta (BOCA SANTA; SOARES; RIELLA, 2016).

Para demonstrar a rapidez com que a pasta endurece e para fins de comparação, calculou-se a velocidade de pega para o sistema VP, utilizando a Equação 5. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 6.

$$VP = \frac{DP}{t_{10} - t_4} \quad (5)$$

Em que:

DP, é a distância de penetração mantida constante (6 mm);

VP, é a velocidade de pega (mm/min);

t_{10} , é o tempo decorrido até a agulha atingir uma resistência a penetração igual a 10 mm;

t_4 , é o tempo decorrido até a agulha atingir uma resistência a penetração igual a 4 mm.

Tabela 6 - Velocidade de pega do sistema VP

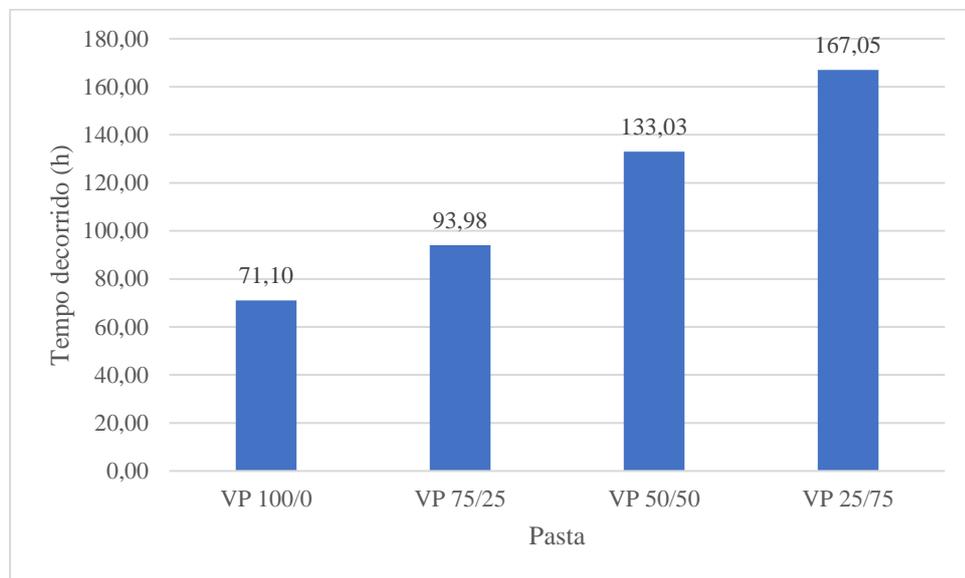
Pasta	Velocidade de pega (mm/min)
VP 25/75	0,0040
VP 50/50	0,0067
VP 75/25	0,0118
VP 100/0	0,0166

Fonte: Elaborada pelo autor

Como pode ser observado na tabela, dentre as pastas do sistema VP, a que apresentou a maior velocidade de pega foi a VP 100/0, conseqüentemente, ela apresentou o menor tempo inicial de pega, em torno de 52,1 horas.

Para o tempo de fim de pega, utilizou-se como base a ABNT NBR 16607 (2018), onde esse parâmetro é definido como o intervalo de tempo transcorrido desde o momento da confecção da pasta até o momento em que a agulha de Vicat penetra 0,5 mm na pasta. Portanto, são apresentados os resultados adquiridos através desse ensaio no gráfico da Figura 20.

Figura 20 - Tempo de fim de pega do sistema VP



Fonte: Elaborada pelo autor

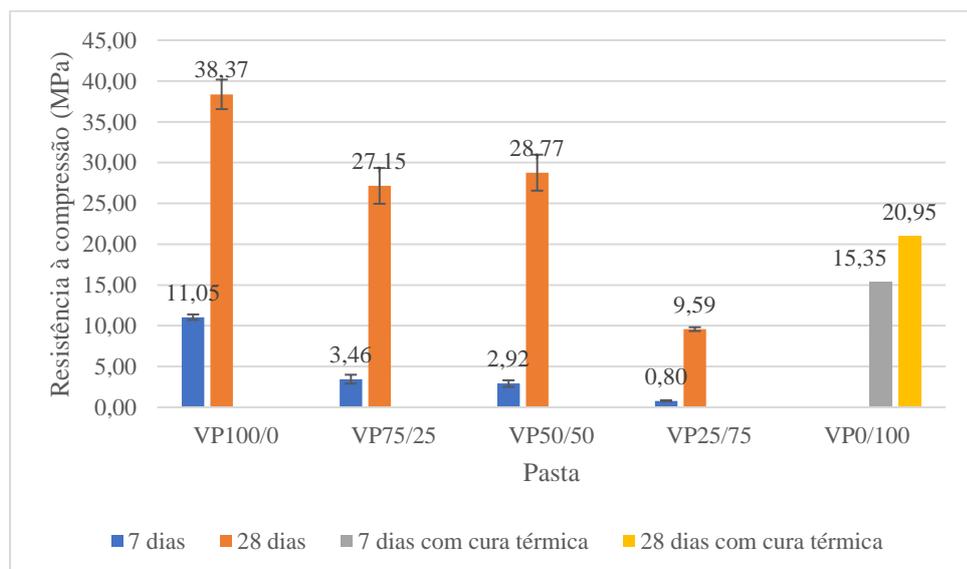
Como esperado, o resultado do tempo de fim de pega foi de acordo com o tempo de pega inicial, quanto maior a porcentagem de cinza pesada na pasta, maior é o tempo decorrido. A pasta VP 0/100 não é apresentada no gráfico pois não teve início de pega, conseqüentemente, não foi possível a determinação do tempo final de pega.

O tipo de cinza volante presente na mistura, a relação entre os ativadores, a relação precursor/ativador, a reatividade, o tamanho das partículas e a composição química, em especial o teor de cálcio presente no precursor, interferem significativamente nas características das pastas, inclusive no tempo de pega (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014; WIJAYA; EKAPUTRI; TRIWULAN, 2017; ZHANG *et al.*, 2018). Contudo, o tipo de cinza é o fator variável, portanto, a composição química, a reatividade e as dimensões das partículas são os principais fatores influentes. Ambas as cinzas têm baixo teor de cálcio, logo a reatividade e a finura devem ser os responsáveis por esse resultado de tempo de pega. Sendo a cinza volante mais reativa e com partículas menores, favorecendo o início da reação química (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2003)

4.1.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão das pastas foi realizada após a cura em temperatura ambiente, com exceção da pasta que continha em sua composição 100 % de cinza pesada (VP 0/100), que não apresentou pega, como visto no item 4.1.1. Nesse caso, foi realizada cura térmica em estufa à 80 °C. O resultado do ensaio de resistência à compressão em 7 e 28 dias e o desvio padrão para cada pasta podem ser verificados no gráfico da Figura 21.

Figura 21 - Resistência à compressão do Sistema VP



Fonte: Elaborada pelo autor

A pasta VP 0/100 em destaque, teve cura em estufa e seu alto valor de resistência à compressão de 15,35 MPa em 7 dias, quando comparado aos outros, se deu por conta dessa cura térmica, pois a cura em estufa com temperatura superior a 70 °C interfere no resultado de resistência à compressão, aumentando-a. Provavelmente isso ocorre devido à aceleração da reação entre Al e Si, por conta do aumento de temperatura (ČEŠNOVAR *et al.*, 2019).

Como observado no gráfico da Figura 21, uma maior porcentagem de cinza pesada interfere negativamente na resistência à compressão da pasta, sendo assim, a pasta com 100% de cinza volante, VP 100/0, apresentou uma melhor resistência à compressão, tanto para 7 dias como para 28 dias.

A fim de comparar o aumento de resistência à compressão das pastas no decorrer do tempo, calculou-se a taxa de ganho de resistência (TR) através da Equação 6.

$$TR = \frac{R_{28} - R_7}{R_7} \quad (6)$$

Em que:

TR, é a taxa de ganho de resistência;

R₂₈, é a resistência à compressão aos 28 dias, em MPa;

R₇, é a resistência à compressão aos 7 dias, em MPa.

Através da Equação 6, pode-se identificar que as pastas que continham maior porcentagem de cinza pesada apresentaram maiores ganhos de resistências no decorrer do tempo. Também pode ser visto que quando a pasta é curada termicamente, não há um grande aumento quando comparado a resistência à compressão de 7 e 28 dias. Essas taxas são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Taxa de ganho de resistência do sistema VP

Pasta	Taxa de ganho de resistência (TR)
VP 100/0	2,47
VP 75/25	6,86
VP 50/50	8,86
VP 25/75	11,04
VP 0/100	0,36

Fonte: Elaborada pelo autor

A taxa de ganho de resistência sugere que uma maior proporção de cinza pesada, possibilita maiores resistências no decorrer do tempo. Supõe-se que à longo prazo as pastas que contenham cinza pesada, venham a atingir valores maiores de resistência à compressão. Em contrapartida, quando a pasta é curada termicamente, não há grande ganho de resistência entre 7 e 28 dias. Como esse precursor ainda é pouco estudado, é necessário pesquisas mais detalhadas para confirmar esse comportamento.

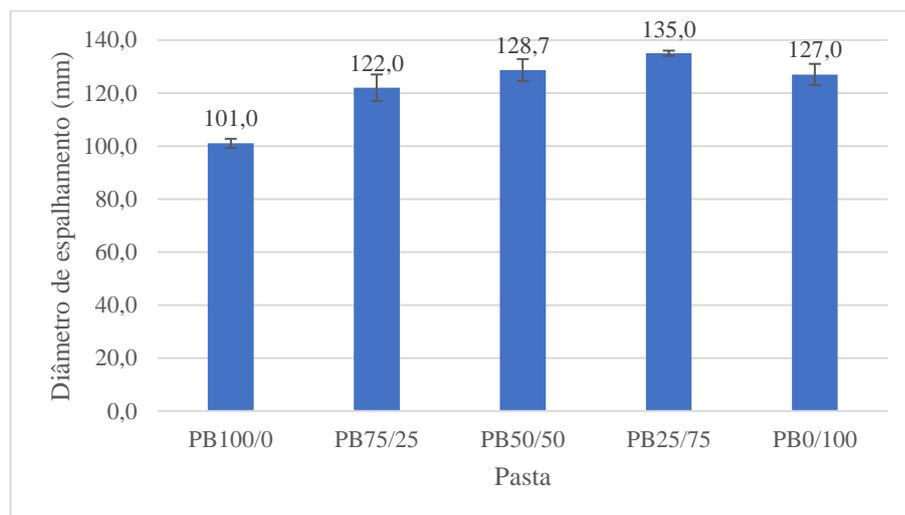
4.2 Sistema de cinza pesada e escória BOF

O sistema binário composto por cinza pesada e escória de aciaria BOF recebeu a nomenclatura de sistema PB. A seguir são apresentados os resultados dos ensaios no estado fresco e do ensaio de resistência à compressão.

4.2.1 Resultados dos ensaios em estado fresco

Os resultados do mini slump para o sistema PB e seu desvio padrão podem ser observados no gráfico da Figura 22.

Figura 22 - Mini slump do sistema PB



Fonte: Elaborada pelo autor

Devido as mesmas razões observadas no sistema VP, para a pasta PB 100/0 não foi executado o ensaio funil Marsh. Esse ensaio também não foi executado para pasta PB 0/100,

que apresentou características fluidas em sua mistura, mas foi observada perda de trabalhabilidade rapidamente, a Figura 23 mostra o comportamento da pasta minutos após a mistura.

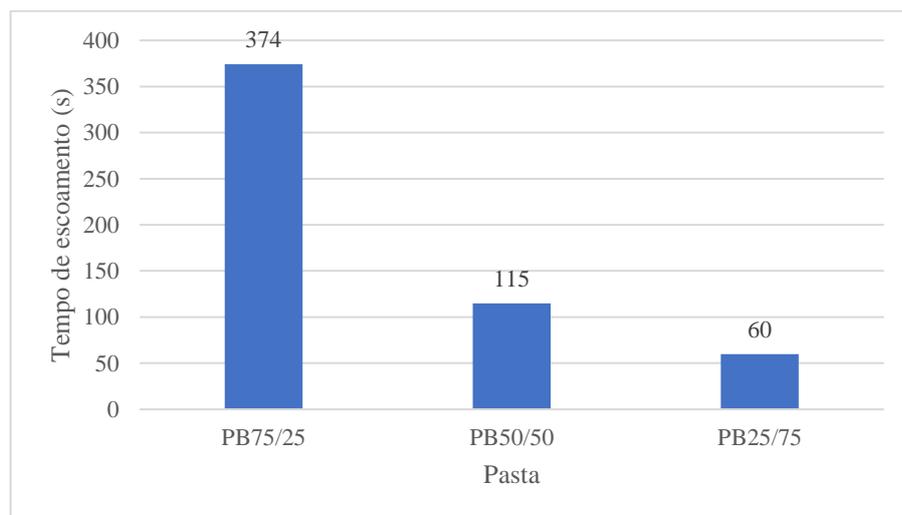
Figura 23 - Pasta PB 0/100



Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados das demais pastas são apresentados no gráfico da Figura 24.

Figura 24 - Índice de fluidez do sistema PB



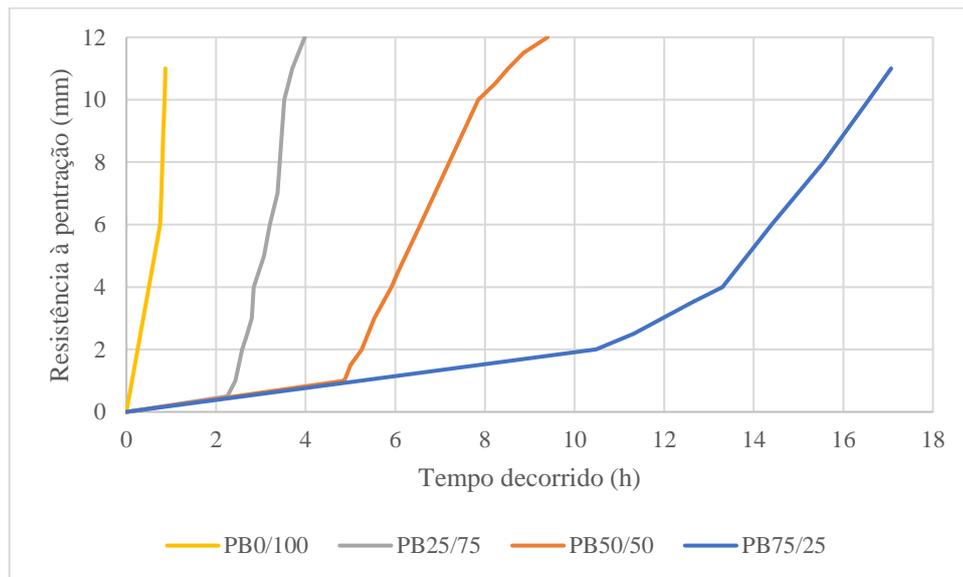
Fonte: Elaborada pelo autor

Comparando os resultados obtidos no mini slump e no ensaio de índice fluidez pelo funil de Marsh, é possível constatar que a pasta que apresentou uma melhor trabalhabilidade

dentro do sistema PB, foi a pasta PB 25/75, pois a mesma obteve o maior diâmetro de espalhamento e o menor tempo de escoamento no funil, sendo respectivamente, 135 mm e 60 segundos.

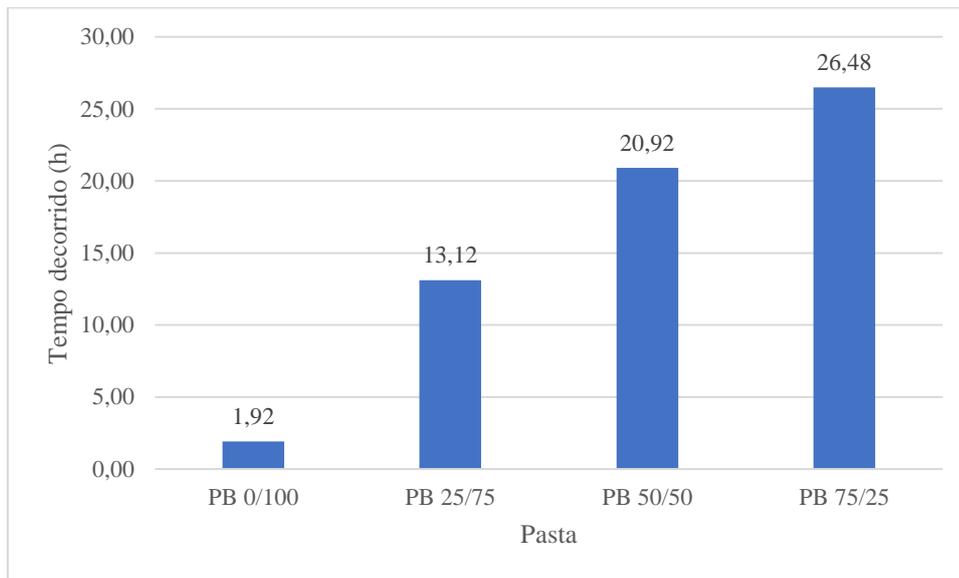
Também pode-se observar que a maior porcentagem de cinza pesada influenciou no comportamento das pastas, tornando-as menos fluidas. Já para a pasta PB 0/100, que não continha nenhuma porcentagem de cinza pesada, o espalhamento foi menor, quando comparado aos das pastas imediatamente anteriores, isso provavelmente se deu pelo alto teor de cálcio presente na escória BOF, que faz com que a pasta inicie a pega de maneira mais rápida, perdendo a sua trabalhabilidade (WIJAYA; EKAPUTRI; TRIWULAN, 2017; ZHANG *et al.*, 2018). Isso é confirmado no ensaios de tempo de pega, cujos resultados são apresentados nas Figuras 25 e 26.

Figura 25 - Tempo de pega inicial do sistema PB



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 26 - Tempo de fim de pega para o sistema PB



Fonte: Elaborada pelo autor

A pasta que apresentou menor tempo inicial de pega e, conseqüentemente, menor tempo de fim de pega foi a PB 0/100 (100% escória BOF), levando cerca de 45 minutos para atingir uma resistência à penetração igual a 6 mm e em torno de 1 hora e 52 minutos para atingir o fim de pega. De acordo com os dados do gráfico, pode-se constatar que quanto maior a porcentagem de escória de aciaria BOF, mais rápida irá ocorrer a pega, portanto, esse precursor age como um acelerador de pega.

Esse comportamento é justificado pelo alto teor cálcio, em torno de 52%, presente na amostra utilizada de escória de aciaria BOF. Isso influencia diretamente no tempo de pega da pasta (WIJAYA; EKAPUTRI; TRIWULAN, 2017), fazendo com que a pasta endureça mais rapidamente.

A velocidade de pega desse sistema, calculada como indicado no item 4.1.1 são encontrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Velocidade de pega do sistema PB

Pasta	Velocidade de pega (mm/min)
PB 75/25	0,03
PB 50/50	0,05
PB 25/75	0,15
PB 0/100	0,67

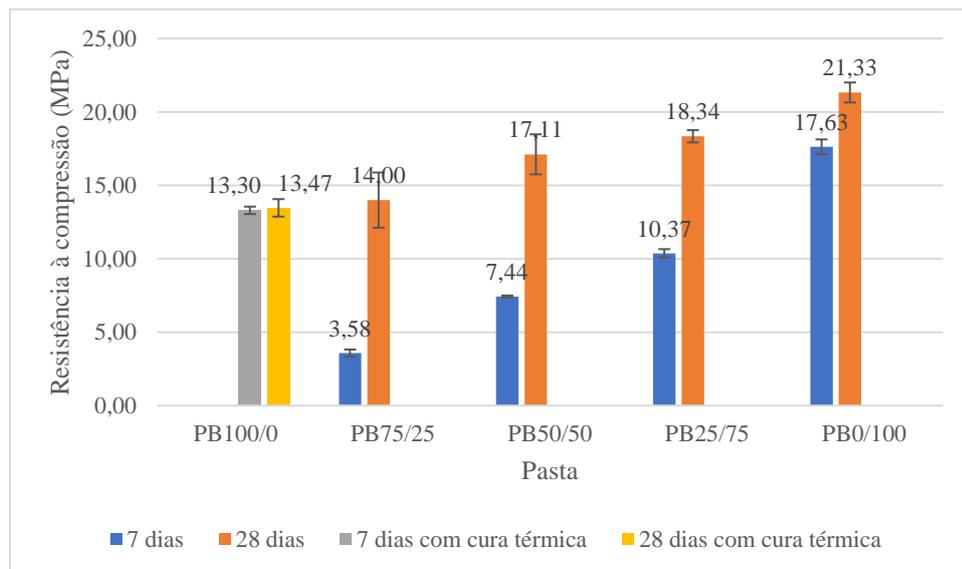
Fonte: Elaborada pelo autor

Como esperado, a pasta com 100% de escória (PB 0/100) obteve a maior velocidade de pega, a mesma que atingiu um menor tempo de início e fim de pega. Enquanto a pasta com 75% de cinza pesada obteve menor taxa, ressalta-se que a pasta com 100% de cinza pesada não apresentou pega.

4.2.2 Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias e o desvio padrão para cada pasta podem ser verificados no gráfico da Figura 27.

Figura 27 - Resistência à compressão do sistema PB



Fonte: Elaborada pelo autor

A pasta PB 100/0 (100% de cinza pesada), em destaque, também foi curada termicamente à 80°C, por isso, atingiu uma resistência de 13,30 MPa aos 7 dias. No entanto, conforme visualizado na Figura 27, a maior porcentagem de cinza pesada faz com que haja um decréscimo da resistência à compressão nas pastas curadas em temperatura ambiente. Portanto, a pasta com maior porcentagem de escória BOF (PB 0/100) apresentou uma melhor resistência à compressão, tanto para 7 dias como para 28 dias, sendo igual a 17,63 MPa e 21,33 MPa, respectivamente.

Utilizou-se a Equação 6 para identificar o ganho de resistência das pastas no decorrer do tempo, os resultados estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9 - Taxa de ganho de resistência do sistema PB

Pasta	Taxa de ganho de resistência (TR)
PB 0/100	0,21
PB 25/75	0,77
PB 50/50	1,30
PB 75/25	2,91
PB 100/0	0,01

Fonte: Elaborada pelo autor

Pode-se observar que uma maior quantidade de cinza pesada, quando não curada termicamente, eleva o maior ganho resistência à compressão de entre 7 dias e 28 dias, isso não se aplica a pasta PB100/0, curada termicamente. Esse resultado é semelhante ao sistema VP.

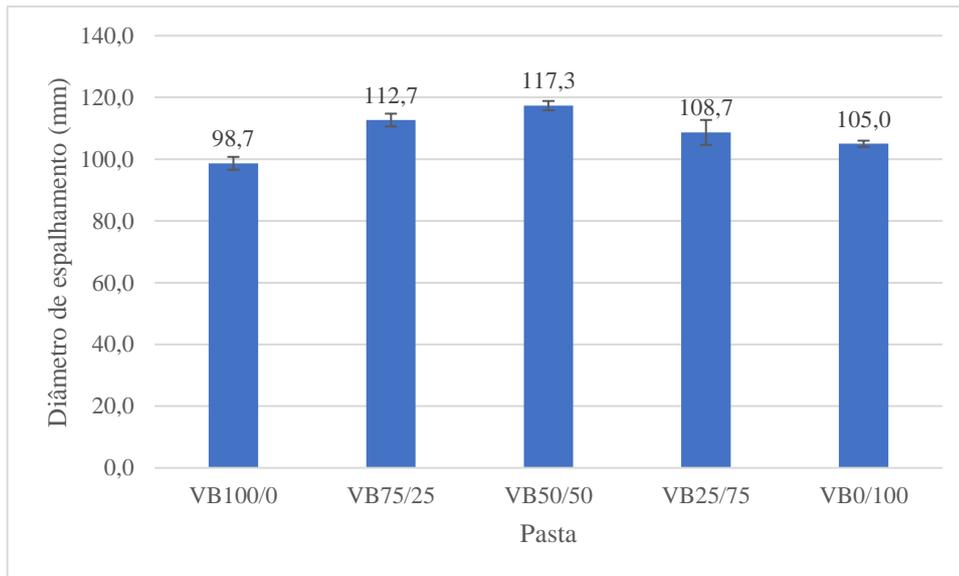
4.3 Sistema de cinza volante e escória BOF

O sistema binário composto por cinza volante e escória de aciaria BOF recebeu a nomenclatura de sistema VB. Em seguida são apresentados seus resultados no estado fresco e o resultado da resistência à compressão.

4.3.1 Resultados dos ensaios em estado fresco

Os resultados do mini slump para o sistema VB e seu desvio padrão podem ser observados no gráfico da Figura 28.

Figura 28 - Mini slump do sistema VB



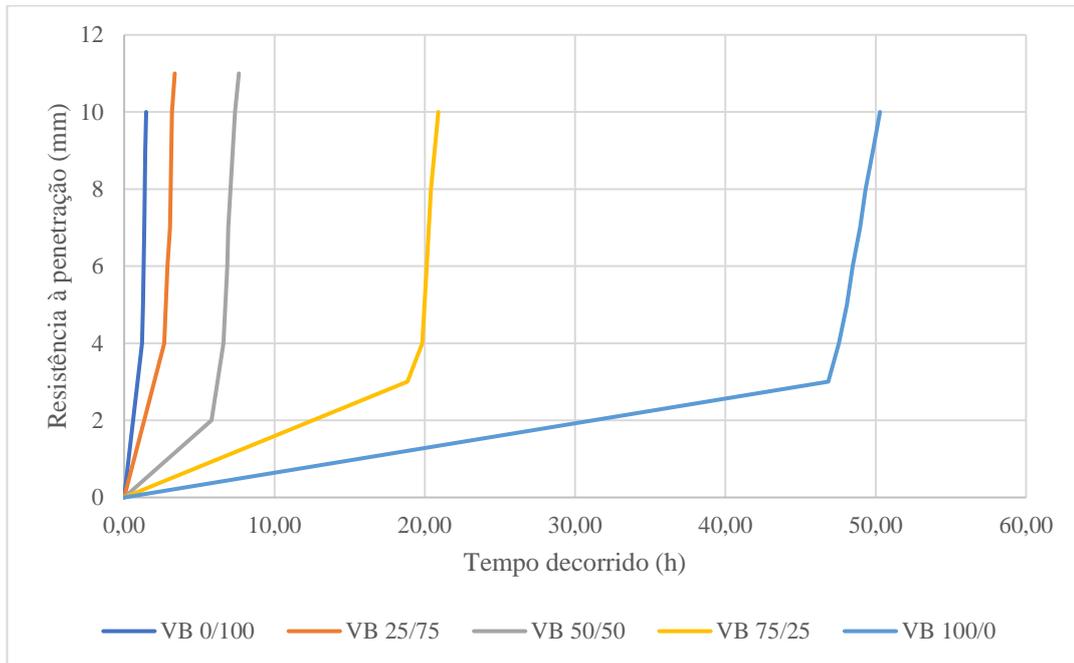
Fonte: Elaborada pelo autor

Como visto no gráfico da Figura 28, a pasta que apresentou uma melhor trabalhabilidade continha 50% de cada componente (VB 50/50). O diâmetro de espalhamento dessa pasta foi igual a 117,3 mm, demonstrando ter características mais fluidas.

Assim como no sistema VP, a combinação entre as partículas menores da cinza volante e maiores da escória de aciaria BOF favorece o empacotamento da mistura, fazendo com que os vazios deixados pelas partículas maiores possam ser preenchidos pelas partículas menores, tornando a pasta mais fluidas (SATHONSAOWAPHAK; CHINDAPRASIRT; PIMRAKSA, 2009). Como dito para a pasta VP 100/0, como a cinza volante tem uma alta área de superfície específica, demanda uma maior quantidade de ativador para que as partículas possam ser envoltas (CAMPOS *et al.*, 2019), justificando o diâmetro de espalhamento encontrado para a pasta VB 100/0

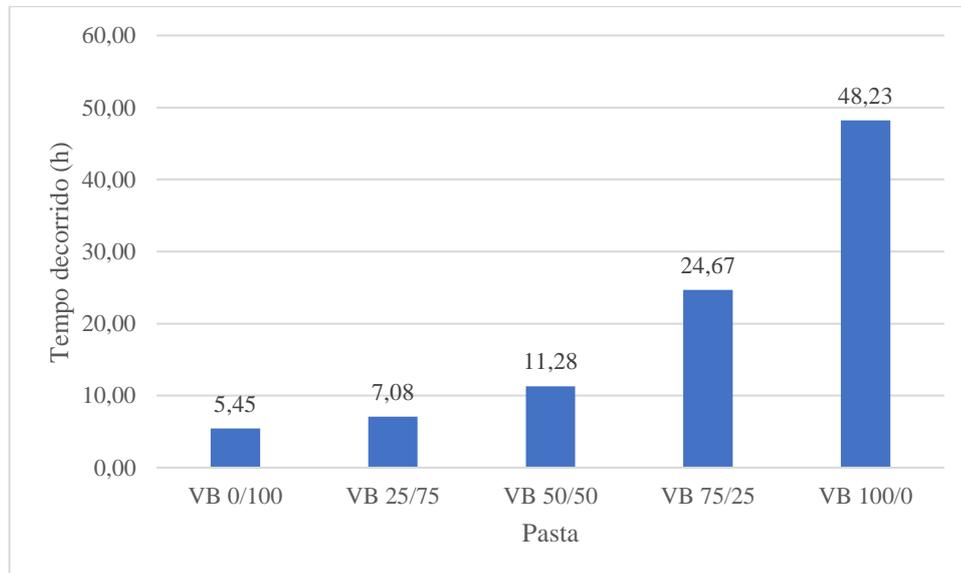
Os tempos de pega inicial e final para o sistema VB podem ser observados nos gráficos da Figura 29 e 30, respectivamente.

Figura 29 - Tempo de pega inicial do sistema VB



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 30 - Tempo de fim de pega do sistema VB



Fonte: Elaborada pelo autor

Como observado na Figura 29, o aumento de escória BOF favorece o enrijecimento das pastas mais rapidamente, como já observado no sistema PB. Assim, a pasta VB 0/100, com 100% de escória BOF, atingiu início de pega em cerca de 1,3 horas e o fim de pega por volta de 5,45 horas. A quantidade de escória BOF também influencia na velocidade que a ocorre a

pega da pasta, uma vez que o enrijecimento ocorre de maneira mais rápida. A velocidade de pega das pastas do sistema VB é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 - Velocidade de pega do sistema VB

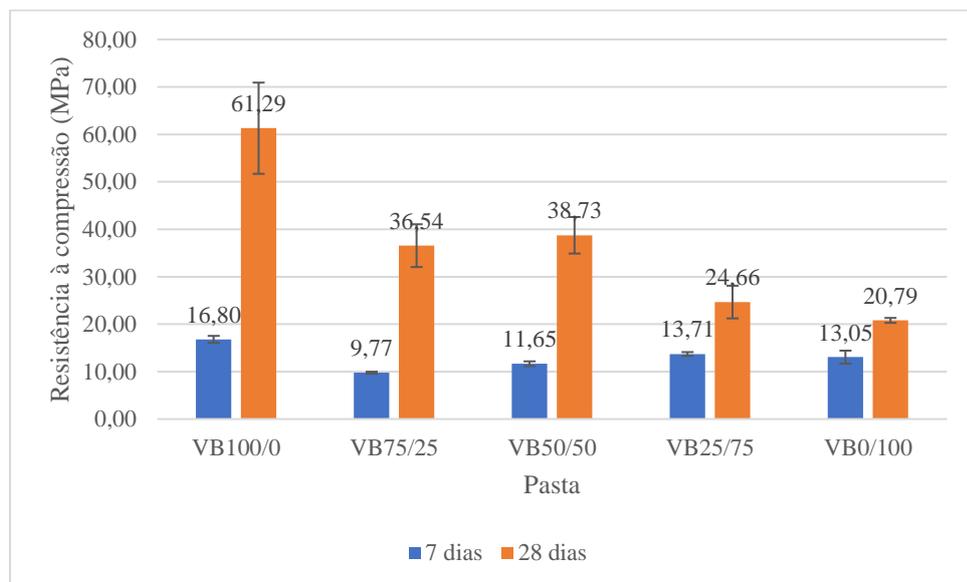
Pasta	Velocidade de pega (mm/min)
VB 100/0	0,04
VB 75/25	0,09
VB 50/50	0,13
VB 25/75	0,19
VB 0/100	0,38

Fonte: Elaborada pelo autor

4.3.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão aos 7 dias e 28 dias é indicada no gráfico da Figura 31, assim como, o desvio padrão dos resultados.

Figura 31 - Resistência à compressão do sistema VB



Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme a Figura 31, a pasta com 100% de cinza volante (VB100/0) obteve uma maior resistência à compressão. Pode-se verificar que quanto maior a porcentagem de cinza

pesada, maior o valor da resistência à compressão aos 28 dias. Na Tabela 11, pode-se observar a taxa de ganho de resistência à compressão do sistema VB, que teve um aumento, de acordo com o incremento de cinza volante.

Tabela 11 - Taxa de ganho de resistência do sistema VB

Pasta	Taxa de ganho de resistência (TR)
VB 0/100	0,59
VB 25/75	0,80
VB 50/50	2,32
VB 75/25	2,74
VB 100/0	2,65

Fonte: Elaborada pelo autor

4.4 Influência dos precursores nas propriedades investigadas

Inicialmente, considerando apenas o sistema VP, sem o incremento de escória de aciaria BOF, observou-se que, à medida que a cinza pesada foi incorporada nas pastas com cinza volante, tornou a mistura menos trabalhável, como observado nos gráficos das Figuras 15 e 16. A adição de cinza pesada também diminuiu a trabalhabilidade do sistema PB (Figura 22), onde o aumento de cinza pesada tornou as pastas menos fluidas. Como citado, isso provavelmente ocorre pelo fato de a cinza pesada ter partículas porosas e irregulares (LONGHI, 2015).

Além dos precursores, a concentração molar do hidróxido de sódio também foi um fator variável entre esses dois sistemas, 10 mol/l e 8 mol/l para VP e PB, respectivamente. Portanto, somente as pastas PB 100/0 e VP 0/100 podem ser comparadas diretamente, pois ambas têm somente a concentração molar como fator variável. Sendo assim, pode-se observar que o aumento da concentração molar fez com que a pasta VP 0/100 se tornasse menos trabalhável, uma vez que o seu diâmetro de espalhamento foi igual a 92,2 mm. Enquanto, a pasta com 100% de cinza pesada e uma concentração molar igual a 8 mol/l, atingiu um diâmetro de espalhamento igual a 101,0 mm. Esse comportamento é semelhante aos encontrados na literatura, que confirmam que o aumento da concentração molar de hidróxido de sódio torna a

pasta menos trabalhável (LI *et al.*, 2013; SATHONSAOWAPHAK; CHINDAPRASIRT; PIMRAKSA, 2009).

No sistema VB, trabalhou-se apenas com cinza volante e escória BOF. Nesse sistema observou-se que, ao adicionar 50% de cada precursor na mistura, a pasta obteve a característica mais fluida dentre as outras, isso pode ser observado no gráfico da Figura 28. Portanto, a escória de aciaria, quando adicionada à cinza volante até certo limite, favorece a trabalhabilidade. Isso ocorre pela combinação de partículas de variados tamanhos presentes nos precursores (SATHONSAOWAPHAK; CHINDAPRASIRT; PIMRAKSA, 2009).

Para todas as pastas do sistema VP, o tempo de pega inicial foi demorado, como observado no gráfico da Figura 18. O menor valor registrado foi em torno de 52,1 horas, e quando adicionado 25% de cinza pesada, esse tempo de pega aumentou para aproximadamente 77 horas, seguindo esse comportamento na medida que se aumenta o teor de cinza pesada. Entretanto, há restrições de aplicação, quanto ao tempo de pega, para compósitos moldados in loco. Esse período deve permitir que ocorra a mistura, transporte, lançamento e adensamento, porém, não deve ser estender muito, uma vez que, pode ocasionar problemas como perda de umidade excessiva e atraso no cronograma de execução (BAUER, 2000).

A relação entre os ativadores, a relação precursor/ativador, a reatividade, o tamanho das partículas e a composição química interferem nas características das pastas a base de cinza volante, inclusive no tempo de pega (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014; WIJAYA; EKAPUTRI; TRIWULAN, 2017; ZHANG *et al.*, 2018). Portanto, em uma comparação entre as pastas VP100/0 e VB100/0, ambas com 100% de cinza volante, os demais fatores variáveis entre esses sistemas, como relação solução ativadora/ ligante e concentração molar do hidróxido de sódio, atuam influenciando o comportamento das pastas.

De acordo com Mallikarjuna Rao e Gunneswara Rao (2015), uma maior concentração de hidróxido de sódio em pastas que contenham 100% de cinza volante, faz com que o tempo final de pega seja retardado, assim como, uma menor relação solução/ligante. Contudo, observando os gráficos das Figuras 20 e 30, essa informação difere do que foi encontrado, uma vez que a pasta VB 100/0 obteve um tempo final de pega inferior ao da pasta VP 100/0, que continha uma concentração de hidróxido de sódio menor e relação solução/ligante maior. Portanto, faz-se necessário um estudo mais aprofundado sobre a influência que desses fatores sobre o tempo de pega das pastas álcali ativadas.

Por mais que não seja possível uma comparação direta entre os sistemas VB e PB, foi observado um comportamento semelhante nos tempos de pega desses dois sistemas. Para ambos, a escória BOF funcionou como um acelerador de pega, o que pode ser observado nos gráficos das Figuras 25 e 29, onde o início de pega foi mais acelerado à medida que aumentasse o teor da escória. Uma alteração importante pode ser observada na pasta PB 75/25, em que a incorporação de apenas 25% de escória BOF permitiu que o início de pega ocorresse em 14,4 horas após a mistura na argamassadeira. Isso se deve ao alto teor de cálcio presente na escória de aciaria (WIJAYA; EKAPUTRI; TRIWULAN, 2017), como pode ser observado na Tabela 1. Portanto, pode-se afirmar que a escória de aciaria do tipo BOF acelera o tempo de pega inicial e final de pastas compostas com cinzas de combustão de carvão mineral.

Observou-se no gráfico da Figura 21, que a resistência à compressão do sistema VP aos 7 e 28 dias, sofria um decréscimo com a adição de cinza pesada, esse comportamento já era esperado. Como indicado na literatura, quanto maior a porcentagem de cinza volante na mistura, maior será a sua resistência à compressão (RANJBAR *et al.*, 2014). Nesse sistema, o maior valor de resistência à compressão aos 7 dias foi de 11,05 MPa, correspondente a pasta VP 100/0, que continha 100% de cinza volante no seu preparo.

Para o sistema VB, que continha a mesma porcentagem de cinza volante, o valor atingido aos 7 dias foi 16,80 MPa, de acordo com o gráfico da Figura 31. Essa diferença ocorreu pelo aumento da concentração molar do hidróxido de sódio e a menor relação solução/ligante desse sistema (SATHONSAOWAPHAK; CHINDAPRASIRT; PIMRAKSA, 2009; MALLIKARJUNA RAO; GUNNESWARA RAO, 2015; LIVI, 2013)

A adição de escória BOF no sistema PB promoveu um aumento na resistência à compressão, registrando um acréscimo aos 28 dias para as pastas com 25% e 75% de escória, de 14 MPa para 18,34 MPa, respectivamente, esses resultados podem ser observados no gráfico da Figura 27. Isso é confirmado nos estudos de Aziz *et al.* (2017) e Yang *et al.* (2018), que indicam que o teor de escória de aciaria pode interferir de forma significativa no ganho de resistência à compressão de pastas álcali ativadas (AZIZ *et al.*, 2017; YANG *et al.*, 2018).

5 CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas no estudo:

- Quanto as pastas do sistema VP apresentaram tempos de início de pega consideravelmente demorados, variando de 52,1 a 114,52 horas. Nesse sistema, quanto maior o teor de cinza pesada maior o retardo nos tempos de pega;
- As pastas com 100% de cinza pesada, tanto no sistema VP quanto no sistema PB não apresentaram início de pega no intervalo de 100 horas, isso inviabiliza seu uso em temperatura ambiente;
- A incorporação de escória de aciaria BOF no sistema PB promoveu tempos iniciais de pega de 14.4 h, 6.56 h e 3.2 h com a adição de 25%, 50% e 75%, respectivamente. Comportamento similar foi observado no sistema VB, que obteve tempo inicial de pega em torno de 20,13 h, 6,87 h, 2,88h com a adição de 25%, 50%, 75% de escória de aciaria. Portanto, a escória de aciaria BOF atuou como acelerador de pega em misturas com cinza volante e cinza pesada;
- A trabalhabilidade, medida pela fluidez das pastas, do sistema VP foi otimizada com 50% de cinza pesada e 50% de cinza volante. Comportamento similar foi observado no sistema PB, isso pode ter se dado pelo melhor empacotamento de grãos entre dois precursores diferentes;
- A resistência à compressão, aos 28 dias, do sistema VP atingiu valores entre 9,59MPa e 38,37MPa. Os melhores resultados ocorrem com o aumento do percentual de cinza volante nas misturas;
- A resistência à compressão, aos 28 dias, do sistema PB aumentou com o acréscimo percentual de escória BOF, atingindo valores iguais a 14,00 MPa, 17,11 MPa e 18,34 MPa, com o acréscimo de 25%, 50% e 75% de escória de aciaria, respectivamente;
- A resistência à compressão, aos 28 dias, do sistema VB demonstrou que ao adicionar 25% de escória BOF houve uma queda na resistência à compressão da cinza volante;

De modo geral, a adição de escória de aciaria BOF, influencia de maneira significativa no tempo de pega de pastas a base de cinzas de combustão de carvão mineral álcali ativadas, acelerando o tempo de início e fim de pega com cura em temperatura ambiente. Além disso na proporção correta, a adição de escória pode influenciar de maneira positiva na trabalhabilidade e na resistência à compressão. Dessa forma, é viável a utilização de escória de aciaria combinada com cinzas do carvão mineral em misturas binárias álcali ativadas.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

As conclusões apresentadas nesse trabalho são restritas às condições de investigação e ensaios realizados. Contudo, mais estudos e experimentos são necessários para alavancar o conhecimento sobre esses materiais. Portanto, recomenda-se os seguintes estudos para complementar os resultados obtidos:

- a. Realizar o estudo de calorimetria complementarmente ao tempo de pega pelo método de VICAT;
- b. Realizar análises químicas e microestruturais nas pastas endurecidas a base de cinza volante, cinza pesada e escória de aciaria;
- c. Realizar estudo da resistência à compressão em sistemas com cinzas pesadas à longo prazo;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16738**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7681-2**: Calda de cimento para injeção - Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos- Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION. Fly ash facts for highway engineers. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (Ed.). . **Climate Change 2013 - The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. v. 53p. 1–30.

ARRIBAS, Idoia; SANTAMARÍA, Amaia; RUIZ, Estela; ORTEGA-LÓPEZ, Vanesa; MANSO, Juan M. Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete. **Construction and Building Materials**, v. 90, p. 68–79, ago. 2015.

AZEVEDO, G. S.; STRECKER, K.; ARAÚJO, A. G.; SILVA, C. A. Produção de geopolímeros à base de cinza volante usando soluções ativadoras com diferentes composições de Na₂O e Na₂SiO₃. **Cerâmica**, v. 63, n. 366, p. 143–151, 2017.

AZIZ, Ikmal Hakem; ZULKIFLY1, Khairunnisa; SAKKAS, Konstantinos; PANIAS, Dimitrios; TSAOUSI, Georgia Maria; BAKRI1; Mohd Mustafa Abdullah Al; YONG1, Heah Cheng. The Characterization of Steel Slag by Alkali Activation. **Open Access Library Journal**, v. 04, n. 11, p. 1–13, 2017.

- BAUER, Luiz A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC –v.1 -2000
- BOCA SANTA, R. A. A.; SOARES, C.; RIELLA, H. G. Geopolymers with a high percentage of bottom ash for solidification/immobilization of different toxic metals. **Journal of Hazardous Materials**, v. 318, p. 145–153, 2016.
- CASTRO, A. L. DE; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Desempenho de concretos avançados para a construção civil, formulados a partir do método de dosagem computacional. **Cerâmica**, v. 55, n. 335, p. 233–251, set. 2009.
- CAMPOS, H. F.; ROCHA, T. M. S.; REUS, G. C.; KLEIN, N. S.; MARQUES FILHO, J. Determination of the optimal replacement content of Portland cement by stone powder using particle packing methods and analysis of the influence of the excess water on the consistency of pastes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, vol. 12, no 2, abril de 2019, p. 210–32.
- ČEŠNOVAR, Mark; TRAVEN, Katija; HORVAT, Barbara; DUCMAN, Vilma. The potential of ladle slag and electric arc furnace slag use in Synthesizing alkali activated materials; the influence of curing on mechanical properties. **Materials**, v. 12, n. 7, 2019.
- COMPANHIA SIDERURGICA DO PECÉM. **Co-Produtos**. Disponível em: <<https://www.cspecem.com/pt-br/produtos/co-produtos/>>. Acesso em: 11 abr. 2020.
- COSTA, H. N. **Cimento álcali ativado à base de cinzas do carvão mineral e escória de aciaria**. Tese em adamento. Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-Ce.
- CRISTELO, Nuno; COELHO, João; MIRANDA, Tiago; PALOMO, Ángel; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, Ana.. Alkali activated composites – An innovative concept using iron and steel slag as both precursor and aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 103, n. February, p. 11–21, 2019.
- 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.; 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.

ERDOGAN, S. T. Properties of Ground Perlite Geopolymer Mortars. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 7, p. 04014210, jul. 2015.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Characterisation of Fly Ashes: potential reactivity as alkaline cements. **Fuel**, v. 82, n. 18, p. 2259- 2265, 2003.

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.

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

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PUERTAS, F.; ARTEAGA, A. Determination of kinetic equations of alkaline activation of blast furnace slag by means of calorimetric data. **Journal of Thermal Analysis**, 1998.

FERREIRA, V. R. **Hidróxido de potássio**. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/compostos-quimicos/hidroxido-de-potassio/>>. Acesso em: 24 jun. 2020.

HARDJITO, D.; RANGAN, B. V. **Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete**. Curtin – University of Technology, 2005.

HASHEMI, S. S. G.; MAHMUD, H. B.; DJOBO, J. N. Y.; TAN, C. G.; ANG, B. C.; RANJBAR, N. Microstructural characterization and mechanical properties of bottom ash mortar. **Journal of Cleaner Production**, v. 170, p. 797–804, 2018.

HEAH, C. Y. C.Y.; KAMARUDIN, H.; MUSTAFA, A. M.; BNHUSSAIN, M.; LUQMAN, M.; KHAIRUL NIZAR, I.; RUZAIDI, C. M.; LIEW, Y. M.; Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 912–922, 2012.

INSTITUT FÜR ARBEITSSCHUTZ DER DEUSTSCHEN GESETZLICHEN UNFALLVERSICHERUNG, IFA. **GESTIS Substance Database: Sodium Hydroxide**. Sankt Augustin, Germany, p. 19. 2012.

KUENZEL, C.; GROVER, L. M.;VANDEPERRE, L.; BOCCACCINI, A. R.; CHEESEMAN, C. R. Production of nepheline/quartz ceramics from geopolymer mortars. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 33, n. 2, p. 251–258, fev. 2013.

LI, X.; MA, X.; ZHANG, S.; ZHENG, E. Mechanical Properties and Microstructure of Class C Fly Ash-Based Geopolymer Paste and Mortar. **Materials**, v. 6, n. 4, p. 1485–1495, 9 abr. 2013.

LI, C.; SUN, H.; LI, L. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 9, p. 1341–1349, 2010.

LIU, Z.; ZHANG, D. W.; LI, L.; WANG, J.; SHAO, N.; WANG, D. Microstructure and phase evolution of alkali-activated steel slag during early age. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 158–165, 2019.

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.

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

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.

MALLIKARJUNA RAO, G.; GUNNESWARA RAO, T. D. Final Setting Time and Compressive Strength of Fly Ash and GGBS-Based Geopolymer Paste and Mortar. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 40, n. 11, p. 3067–3074, nov. 2015.

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.

MENEZES, Christiane Mylena Tavares. **Concreto auto-adensável utilizando metacaulim e pó de pedra como adições minerais**. Tese de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil Modalidade Estruturas. Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE, 2006.

MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. **Waste Management Series**, v. 1, n. C, p. 207–220, 2001.

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.

NOBRE, C. P.; SILVA, A. M. T.; LIMA, M. G. P. N.; CABRAL, A. E. B. Caracterização físico-química de escórias de aciaria para uso como agregados em compósitos cimentícios
Physical-chemical characterization of steel slag for use as aggregates in cement composites
Resumo Introdução Há cerca de 40 anos , organizações interna. p. 1–16, 2017.

NORDSTRÖM, Jonas; NILSSON, Erik; JARVOL, Patrik; NAYERI, Moheb; PALMQVIST, Anders; BERGENHOLTZ, Johan; MATIC, Aleksandar. Concentration- and pH-dependence of highly alkaline sodium silicate solutions. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 356, n. 1, p. 37–45, abr. 2011.

ORTEGA-LÓPEZ, Vanesa; FUENTE-ALONSO, José A.; SANTAMARÍA, Amaia; SAN-JOSÉ, José T.; ARAGÓN, Ángel. Durability studies on fiber-reinforced EAF slag concrete for pavements. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 471–481, fev. 2018.

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

PAN, Z.; SANJAYAN, J. G.; RANGAN, B. V. An investigation of the mechanisms for strength gain or loss of geopolymer mortar after exposure to elevated temperature. **Journal of Materials Science**, v. 44, n. 7, p. 1873–1880, 1 abr. 2009.

PETRENKO, S. V.; PITZER, K. S. Thermodynamics of aqueous NaOH over the complete composition range and to 523 K and 400 MPa. **Journal of Physical Chemistry B**, v. 101, n. 18, p. 3589–3595, 1997.

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

PROCTOR, D. M.; FEHLING, K. A.; SHAY, E. C.; WITTENBORN, J. L.; GREEN, J. J.; AVENT, C.; BIGHAM, R. D.; CONNOLLY, M.; LEE, B.; SHEPKER, T. O.; ZAK, M. A. Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags. **Environmental Science and Technology**, v. 34, n. 8, p. 1576–

1582, 2000.

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

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

RANJBAR, Navid; MEHRALI, Mehdi; ALENGARAM, U. Johnson; METSELAAR, Hendrik Simon Cornelis; JUMAAT, Mohd Zamin. Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 114–121, ago. 2014.

RAUCCI, J. S.; CECEL, R. T.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Efeito do método de mistura sobre o espalhamento mini-slump de pastas de cimento Portland. **RIEM - IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 11, n. 2, 2018.

SATHONSAOWAPHAK, A.; CHINDAPRASIRT, P.; PIMRAKSA, K. Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. **Journal of Hazardous Materials**, v. 168, n. 1, p. 44–50, 2009.

THESAURUS. **Metodologia da Pesquisa Científica: teoria e prática - como elaborar TCC**. Brasília, 2016.

TORALDO, Emanuele; SAPONARO, Sabrina; CAREGHINI, Alessandro; MARIANI, Edoardo. Use of stabilized bottom ash for bound layers of road pavements. **Journal of Environmental Management**, v. 121, p. 117–123, 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.

VASCONCELOS, E.; FERNANDES, S.; BARROSO DE AGUIAR, J.L. L.; PACHECO-TORGAL, F. Concrete retrofitting using metakaolin geopolymer mortars and CFRP. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3213–3221, ago. 2011.

VASCONCELOS, S. **Avaliação das carvão mineral produzidas em usina termelétrica para construção de camadas de pavimentos.** Tese de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE, 2018.

MENEZES, Christiane Mylena Tavares. **Concreto auto-adensável utilizando metacaulim e pó de pedra como adições minerais.** Tese de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil Modalidade Estruturas. Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE, 2006.

WANG, S. D.; SCRIVENER, K. L.; PRATT, P. L. Factors affecting the strength of alkali-activated slag. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 6, p. 1033–1043, 1994.

WEDDING, P.; KANTRO, D. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste—A Miniature Slump Test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95, 1980.

WIJAYA, 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.

XIE, Z.; XI, Y. Hardening mechanisms of an alkaline-activated class F fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 9, p. 1245–1249, set. 2001.

YANG, Jianming; LU, Jingwen; WU, Qisheng; XIA, Ming Feng; LI, Xiaohua. Influence of steel slag powders on the properties of MKPC paste. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 137–146, jan. 2018.

YANKWA DJOBO, Jean Noël; ELIMBI, Antoine; KOUAMO TCHAKOUTÉ, Hervé; KUMAR, Sanjay. Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 606–614, out. 2016.

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.