



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANTONIO VANUTTI GALVÃO DA SILVA

UTILIZAÇÃO DE CIMENTO ÁLCALI-ATIVADO PARA PRODUÇÃO DE
COBOGÓ

CRATEÚS

2022

ANTONIO VANUTTI GALVÃO DA SILVA

UTILIZAÇÃO DE CIMENTO ÁLCALI-ATIVADO PARA PRODUÇÃO DE COBOGÓ

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

Orientadora: Prof. Dra. Heloína Nogueira da Costa.

CRATEÚS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Universidade Federal do Ceará

Sistema de Bibliotecas

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

S578u Silva, Antonio Vanutti Galvão da.
Utilização de cimento álcali-ativado para produção de cobogó / Antonio Vanutti Galvão da Silva.
– 2022.
51 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2022.
Orientação: Profa. Dra. Heloína Nogueira da Costa.

1. Cimento álcali-ativado. 2. Bloco vazado. 3. Construção civil. I. Título.

CDD 004

ANTONIO VANUTTI GALVÃO DA SILVA

UTILIZAÇÃO DE CIMENTO ÁLCALI-ATIVADO PARA PRODUÇÃO DE COBOGÓ

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

Aprovado em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Antonio Eduardo Bezerra Cabral
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Thatyana Moratti
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A minha mãe, Aldenora Galvão.

A mim, Vanutti Galvão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por não soltar minha mão em nenhum segundo e por continuar abençoando a minha caminhada.

A minha mãe, Aldenora Galvão, pelo seu exemplo de força, garra e determinação, por ser meu pai e minha mãe em todos os momentos, por fazer o possível e o impossível para me proporcionar minha felicidade e por sempre acreditar no meu potencial. Não existem palavras para descrever o sentimento de gratidão e de felicidade que é ter a senhora como minha mãe, fui muito abençoado em ter sido agraciado para ser seu filho. Se tenho você, tenho tudo. Meu grande amor.

Agradeço também, a minha prima Carla Camila, minha tia Antônia Galvão, minha avó Maria Galvão, a minha madrinha Marlene Galvão (*in memorian*) por sempre acreditarem em mim, por me apoiarem e me ajudarem em todas as minhas decisões e por todo carinho e amor que sempre recebi de vocês, aqui deixo escrito a minha eterna gratidão.

Agradeço também, aos meus amigos de faculdade Helber, Eric e Iuri, pelos inúmeros trabalhos, projetos e demais momentos que realizamos um ao lado do outro, vocês são parte da minha história e trajetória, obrigado por tanto. Elvira, Jefferson e Vitória, por todas as conversas de apoio, por todo carinho e amor que sempre recebi de vocês, minha eterna gratidão. Rafaela, Alessandra, Sinhá, Eloisa, Luana Rodrigues, Mariana, Luanna Loureiro e Netinha, por abrirem a porta de suas casas, me abrigar e tratar como se eu fosse parte da família de vocês, não tenho palavras para agradecer. Amo todos vocês.

Agradeço também, a minha orientadora de milhões Heloína Nogueira, por ser essa professora e pessoa extremamente dedicada, generosa, gentil e sempre disposta a ajudar. Sem sua ajuda, nada disso teria sido possível. Serei eternamente grato pelo momento que me aceitou para ser seu orientando. Continue esse ser de muita luz, generosidade e amor. Agradeço também ao João Victor, Samuel Siqueira e Marília por terem ajudado e colaborado para as práticas da minha pesquisa como se fossem as deles, a ajuda de vocês foi de fundamental importância. Gratidão por tudo. Agradeço também ao Laboratório de Materiais da Construção Civil, aos professores presentes nessa jornada, ao Programa de Educação Tutorial PET – Crateús, em nome da professora Luisa Gardênia, a Universidade Federal do Ceará, ao meu Grupo de Pesquisa em Reaproveitamento de Resíduos e Subprodutos para Produção de Cimentos Ambientalmente Amigáveis (ReActive) pela realização desse sonho incrível.

Agradeço também aos meus amigos de fora da faculdade, Liléia, Oslany, Eliane, dona Ana, Anderson, Fernanda, Rayron, Mateus, Garlena, Ana Paula, Cristiane, Marielle, Rayane, Júnior, Soraya, Luyara, Hércules, Lucas Kauan, João Victor Martins, João Lincoln e

Valkíria, por todo apoio, carinho, preocupação e palavra de incentivo que muitas vezes foram ditas em momentos oportunos e que fizeram toda a diferença. Em especial, um agradecimento a minha amiga Chalyanne por sempre me mostrar que sou capaz, pela confiança, por me tratar como se eu fosse da família, por fazer questão de me ter ao seu lado e por toda generosidade e solidariedade vinda a minha pessoa.

Por fim, agradeço a minha pessoa por nunca desistir dos seus sonhos e se mostrar uma pessoa otimista, dedicada e resiliente em todos os momentos.

“Ouse, arrisque, não desista jamais e saiba valorizar quem te ama, esses sim merecem seu respeito. Quanto ao resto, bom, ninguém nunca precisou de restos para ser feliz.”

Clarice Lispector

RESUMO

As usinas termoelétricas e siderúrgicas são responsáveis por uma significativa geração de resíduos em suas atividades, sendo as cinzas do carvão mineral e as escórias metalúrgicas, respectivamente, os principais materiais residuais dessas indústrias. Tais materiais possuem potencial para substituir o cimento Portland, seja como material cimentício suplementar ou como matéria-prima para outros tipos de ligantes, como o cimento álcali-ativado, que é obtido pela combinação de materiais ricos em aluminossilicatos e ativadores alcalinos. Nesse sentido, a cinza do carvão mineral, a cinza volante e a cinza pesada, assim como as escórias de aciaria, podem ser utilizadas como fonte de aluminossilicatos para obtenção de materiais álcali-ativados. No entanto, ainda são poucos os estudos voltados para a aplicação desse tipo de cimento na produção de artefatos para a construção civil. Portanto, o objetivo deste estudo é avaliar a viabilidade de aplicação de cimento álcali-ativado para produção de cobogó. Para isso foram avaliadas as propriedades no estado fresco e no estado endurecido de argamassas produzidas com cimento álcali-ativado composto por cinza volante, cinza pesada e escória de aciaria do tipo Basic Oxygen Furnace (BOF) como precursores e como ativadores o hidróxido de sódio e o sulfato de sódio. Essas argamassas foram utilizadas para produzir blocos tipicamente utilizados em paredes vazadas. Foram produzidos 03 traços de argamassa variando a composição dos precursores em cimentos binários e ternários. No estado fresco, as amostras de argamassa produzidas foram submetidas ao ensaio de consistência e plasticidade. No estado endurecido, foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial dos cobogós, resistência à tração na flexão e resistência residual após altas temperaturas (800°C) dos corpos de prova. Diante dos resultados obtidos, percebe-se que o traço composto por cinza volante e escória BOF apresentou a melhor trabalhabilidade entre os traços testados. Os cobogós resultantes do traço citado anteriormente, obtiveram a maior resistência à compressão igual a 4,65 MPa. Todos os traços mantiveram-se íntegros após 800°C no teste de resistência residual. Portanto, atesta-se a viabilidade de aplicação de cimento álcali-ativado à base de cinza volante, cinza pesada e escória BOF para produção de bloco vazado não estrutural.

Palavras-chave: Cimento álcali-ativado. Cobogó. Construção civil.

ABSTRACT

Thermoelectric and steel plants are responsible for a significant generation of waste in their activities, with mineral coal ashes and metallurgical slag, respectively, the main waste materials of these industries. Such materials have the potential to replace Portland cement, either as a supplementary cementitious material or as a raw material for other types of binders, such as alkali-activated cement, which is obtained by combining materials rich in aluminosilicates and alkaline activators. In this sense, mineral coal ash, fly ash and bottom ash, as well as steelworks slag, can be used as a source of aluminosilicates to obtain alkali-activated materials. However, there are still few studies focused on the application of this type of cement in the production of artifacts for civil construction. Therefore, the objective of this study is to evaluate the feasibility of applying alkali-activated cement for the production of cobogó. For this purpose, the fresh and hardened properties of mortars produced with alkali-activated cement composed of fly ash, heavy ash and Basic Oxygen Furnace (BOF) steel slag were evaluated as precursors and sodium hydroxide and sodium hydroxide as activators. sodium sulfate. These mortars were used to produce blocks typically used in hollow walls. 03 mixes of mortar were produced varying the composition of the precursors in binary and ternary cements. In the fresh state, the mortar samples produced were submitted to the consistency and plasticity test. In the hardened state, tests were carried out on the cobogós axial compression strength, flexural tensile strength and residual strength after high temperatures (800°C) of the specimens. In view of the results obtained, it can be seen that the mix composed of fly ash and BOF slag showed the best workability among the mixes tested. The cobogós resulting from the aforementioned trait obtained the highest compressive strength equal to 4.65 MPa. All traces remained intact after 800°C in the residual strength test. Therefore, the feasibility of applying alkali-activated cement based on fly ash, heavy ash and BOF slag for the production of non-structural hollow blocks is attested.

Keywords: Alkali-activated cement. Cobogó. Construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Procedimento metodológico.....	27
Figura 2 – Ensaio de consistência e plasticidade.....	31
Figura 3 – Fôrmas e moldagem finalizada dos blocos vazados e corpos de prova.....	32
Figura 4 – Ensaio de resistência à compressão axial.....	33
Figura 5 – Ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão a) flexão; b) compressão.....	33
Figura 6 – Representação dos corpos de prova no forno mufla após sofrer altas temperaturas...	34
Figura 7 – Argamassa após levantamento do mini-cone: a) T1; b) T2; c) T3. Espalhamento após 30 quedas: d) T1; e) T2; f) T3.....	35
Figura 8 – Representação dos blocos vazados fragmentados T2 e T3.....	38
Figura 9 – Análise visual da coloração dos corpos de prova após 800°C: a) tom cinza; b) tom avermelhado.....	40
Figura 10 – Análise visual de eflorescência dos corpos de prova e blocos: a) T1; b) T2; c) T3..	41

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva granulométrica da areia natural.....	29
Gráfico 2 – Resultados de consistência e plasticidade pelo <i>flow table test</i>	35
Gráfico 3 – Resistência à compressão axial dos cobogós.....	37
Gráfico 4 – Resistência à tração e à compressão dos corpos de provas.....	37
Gráfico 5 – Resistência residual após altas temperaturas.....	39
Gráfico 6 – Resistência residual após altas temperaturas em porcentagem.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físicas dos precursores.....	28
Tabela 2 – Porcentagem da composição em massa de óxidos dos precursores.....	28
Tabela 3 – Caracterização do hidróxido de sódio em volume.....	30
Tabela 4 – Caracterização do silicato de sódio.....	30
Tabela 5 – Quantidade de materiais dos traços T1, T2 e T3.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BOF	Basic Oxygen Furnace
CP's	Corpos de prova
C-A-S-H	Aluminossilicato de Cálcio Hidratado
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
LD	Linz-Donawitz
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
pH	Potencial hidrogeniônico
T1	Traço 1
T2	Traço 2
T3	Traço 3

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
μ	Micro
°C	Graus Celsius
Mpa	Megapascal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Contextualização e justificativa da pesquisa.....	18
1.2	Objetivos.....	20
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	20
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	20
1.3	Delimitação.....	20
1.4	Estrutura de Pesquisa	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	Materiais álcali-ativados	22
2.2	Cinzas do carvão mineral	23
2.3	Escória de aciaria	24
2.4	Bloco vazado modular de concreto (cobogó).....	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	Materiais.....	27
3.1.1	<i>Precursores</i>	28
3.1.2	<i>Ativadores</i>	29
3.2	Métodos de Pesquisa	30
3.2.1	<i>Parâmetros de mistura</i>	30
3.2.2	<i>Ensaio realizados</i>	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	Propriedades no estado fresco	35
4.1.1	<i>Ensaio de Consistência e Plasticidade (Flow Table Test)</i>	35
4.2	Propriedades no estado endurecido	36
4.2.1	<i>Características mecânicas das argamassas e dos blocos</i>	36
4.3	Eflorescência	41
5	CONCLUSÃO	42
5.1	Sugestões de trabalhos futuros	43
	REFERÊNCIAS	44
	APÊNDICE A – FLOW TABLE TEST	51
	APÊNDICE B – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS BLOCOS VAZADOS.....	51
	APÊNDICE C – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO DOS CP'S	

PRISMÁTICOS	51
APÊNDICE D – RESISTÊNCIA RESIDUAL.....	52

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e justificativa da pesquisa

O cimento Portland é caracterizado por ser um dos tipos de cimentos mais utilizados ao redor do mundo, principalmente na construção civil, sendo um dos componentes básicos de concretos, argamassas e grautes. Pode ser definido como um pó fino com propriedades aglutinantes, aglomerantes ou ligantes, resistentes a ação da água. O cimento Portland consiste em clínquer e adições minerais. O clínquer é caracterizado por ser o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento Portland, cujo processo de produção envolve a calcinação do calcário. As adições minerais podem variar de um tipo de cimento para outro, tais características definem os diferentes tipos de cimento. (HUYNH; VO; HWANG, 2018).

Globalmente, a indústria de cimento consome mais de 30 bilhões de toneladas de recursos naturais (JEXEMBAYEVA *et al.*, 2020). Deste consumo de recursos naturais, representa cerca de 3% do consumo mundial de energia e cerca de 9% das emissões de CO₂ por tonelada de cimento produzida (MONTEIRO; MILLER; HORVATH, 2017). Além disso, estima-se que o mundo produz hoje cerca de 4 milhões de toneladas de cimento Portland anualmente (NIDHEESH; KUMAR, 2019). Todos esses fatores contribuem para o agravamento dos problemas ambientais existentes, como as emissões de gases de efeito estufa e o aumento do consumo de recursos naturais já escassos.

Diante do exposto, o uso de cimentos não convencionais pode produzir argamassas e concretos alternativos com menor impacto em termos de emissão de gases e redução dos efeitos negativos ao meio ambiente. Alguns tipos de cimentos alternativos utilizam resíduos de outras indústrias, como siderurgia, indústria de papel e usinas termelétricas, como é o caso de materiais ativados quimicamente, que utilizam cinzas da combustão de carvão mineral, argila calcinada e escórias metalúrgicas. Portanto, a cinza volante, a escória de forno de oxigênio básico – BOF (*Basic Oxygen Furnace*) e cinza pesada são representantes dessa categoria de materiais, visto que, são caracterizados por serem subprodutos industriais, em sua maioria sem destinação final adequada, que podem ser constituintes de um cimento álcali-ativado para a produção de um novo material ambientalmente amigável (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).

Muitos estudos têm demonstrado que a cinza volante possui propriedades pozolânicas e, na maioria dos casos, vantagens em propriedades mecânicas e durabilidade em

associada ao cimento Portland (CEZAR, 2011; CANTARELLI, 2007; SACIOTO, 2005; OLIVEIRA, 2007; PETRY, 2004). Contudo, também tem demonstrado boas propriedades na produção de cimento álcali-ativado, desse modo, ao usar essa cinza como alternativa ao cimento Portland pode-se economizar energia e reduzir emissões de gases durante o processo de fabricação do cimento, reduzindo seu custo e aumentando sua durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014; AHMARUZZAMAN, 2010).

As cinzas pesadas, apesar de não haver uma destinação tão fácil quanto as cinzas volantes, elas são caracterizadas por serem os resíduos produzidos pela queima de carvão fóssil em usinas termelétricas, isto é, tem a mesma origem da cinza volante. É um resíduo industrial, logo, seu descarte no meio ambiente está sujeito a condições e regulamentações específicas. Sua utilização na construção civil tem apresentado avanços significativos e boas perspectivas. É válido ressaltar que esta cinza tem sido apontada como potencial precursora do cimento alcalino-ativado devido à sua semelhança com a cinza volante, mas o desempenho observado não é tão bom quanto o desta cinza (LONGHI, 2014; PROVIS; PALOMO; SHI, 2015; XIE; OZBAKKALOGLU, 2015).

A escória BOF (Basic Oxygen Furnace) é oriunda do refino do ferro gusa em usinas siderúrgicas durante a produção do aço. A escória BOF foi apontada como potencial precursora e despertou interesse no trabalho atual (NAIDU; SHERIDAN; VAN DYK, 2020). É válido salientar ainda que na região Metropolitana de Fortaleza há a disponibilidade desses materiais e que segundo estudos anteriores de Costa (2022), Caetano (2021) e Lima (2020), por exemplo, tais materiais têm sido testados mostrando bons resultados.

Diante dessa perspectiva, para minimizar os problemas ambientais, é ideal reaproveitar esses resíduos como matéria-prima para outros processos produtivos. A inserção desses materiais no setor da construção civil pode produzir novos materiais que tornam a construção civil mais econômica e sustentável (SAVASTANO; WARDEN, 2005).

É válido salientar que os estudos e aplicação em relação ao cimento álcali-ativado ainda são recentes e não existe uma base sólida de dados ou estudos que comprove sua durabilidade, pois a inserção de elementos estruturais no mercado da construção pode ser dificultada até a divulgação de estudos mais consolidados. Portanto, o presente estudo busca aplicar o cimento álcali-ativado, utilizando a cinza volante, cinza pesada e escória BOF para a produção de elementos construtivos não estruturais, especificamente, o cobogó, também conhecido como bloco vazado de concreto.

A escolha desse tipo de elemento construtivo é devido a utilização crescente deste elemento nos projetos arquitetônicos, visto que, desde a década de 1970 até os dias atuais,

vidros grandes e fechados têm sido amplamente utilizados na construção de edifícios, permitindo o acesso à luz do dia, ao calor e ao contato visual com o ambiente externo. No entanto, nesses edifícios, a radiação solar através de janelas sem sombra e fachadas de vidro aumenta significativamente a temperatura do ar interno no verão e a reduz no inverno. Isso afeta negativamente o conforto térmico, aumenta a carga de resfriamento e atua como fonte de ofuscamento, prejudicando o desenvolvimento da atividade visual (FREEWAN, 2014). Como solução para melhor conforto ambiental, podem ser utilizados os blocos, que são componentes construtivos com grande potencial funcional, permitindo, além de filtrar a luz solar, a ventilação natural no ambiente interno.

Além disso, os blocos vazados são uma alternativa eficaz para melhorar as condições climáticas dentro das edificações, principalmente em climas quentes, pois esse elemento permite a circulação do ar, reduz a luminosidade excessiva no ambiente e se configura como uma solução eficaz para o aproveitamento dos recursos naturais. É também um componente interessante e versátil que pode ser aplicado em edifícios, proporcionando efeitos uniformes de luz e sombra tanto em interiores como em fachadas e paredes.

Portanto, o presente estudo busca utilizar o cimento álcali-ativado para produção de cobogós, aproveitando a cinza volante, a cinza pesada e a escória BOF, como fontes principais de matérias-primas. Além disso, avaliar a resistência a altas temperaturas dos corpos de prova, que podem ocorrer em estruturas reais em condições de incêndio.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

- Avaliar a viabilidade de aplicação de cimento álcali-ativado à base de cinza volante, cinza pesada e escória de aciaria Basic Oxygen Furnance (BOF) para produção de cobogó.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as propriedades no estado fresco e no estado endurecido de argamassas produzidas com cimento álcali-ativado variando as proporções de precursores;
- Avaliar a resistência à compressão dos cobogós produzidos.

1.3 Delimitação

A presente pesquisa delimitou-se a utilizar a cinza volante, a cinza pesada e a escória BOF como os principais precursores e fontes de aluminossilicato para a produção do cimento álcali-ativado e seus respectivos blocos vazados. Além disso, utilizou-se como ativadores o silicato de sódio e o hidróxido de sódio para a produção dos materiais em questão.

1.4 Estrutura de Pesquisa

A pesquisa está dividida em cinco partes. Na Parte 1, denominada Introdução, são apresentados o contexto e a justificativa do estudo, seus objetivos gerais e específicos e sua definição. A seção 2 contém o referencial teórico, que é um estudo bibliográfico de conteúdo relacionado à realização da pesquisa. Nele, estão sendo abordados os seguintes tópicos: materiais álcali-ativados, cinza volante, cinza pesada, escória BOF e bloco vazado, destacando suas principais características. A seção 3 apresenta os métodos de produção e execução do cimento ativado por álcali e blocos vazados, bem como seus respectivos ensaios. A seção 4 apresenta os resultados e discussões a partir da análise das propriedades no estado fresco e no estado endurecido. Por fim, a Seção 5 contém conclusões e recomendações para pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Materiais álcali-ativados

O uso de álcalis-ativados para produzir uma argamassa semelhante em resistência e endurecimento às argamassas de cimento Portland foi descoberto pela primeira vez por Purdon em 1940. Sua mistura continha areia, escória de aço e álcalis, utilizando inicialmente hidróxido de sódio como ativador alcalino e, posteriormente, hidróxido de cálcio (MALONE; RANDALL, 1985). Em 1950, o ucraniano Glukhovsky desenvolveu um material álcali-ativado, utilizando silicato de cálcio e aluminossilicato (KOMNITSAS; ZAHARAKI, 2007). Mais tarde, na década de 1960, Glukhovsky estudou ligantes à base de escória e concluiu que outros ativadores poderiam ser usados, como fosfatos, fluoretos e carbonatos, e analisaram o efeito do aquecimento e seu efeito nas altas resistências iniciais e impacto na formação de zeólitos durante o tratamento alcalino (MALONE; RANDALL, 1985).

O material álcali-ativado é caracterizado por um ativador alcalino e um precursor em pó rico em aluminossilicato. Os ativadores alcalinos podem ser caracterizados como sais alcalinos, enquanto os precursores podem ser derivados de vários resíduos industriais e vários aluminossilicatos, tais como escória de alto-forno, cinza volante, cinza pesada, escória de aciaria, sílica ativa e semelhantes (SHI; JIMÉNEZ; PALOMO, 2011). Esses materiais possuem diversas nomenclaturas na literatura, tais como: cimento álcali-ativado, geopolímero, geocimento, concreto polimérico inorgânico, cerâmica alcalina, entre outros (SEVERO *et al.*, 2013).

Incêndios envolvendo plásticos na França na década de 1970 estimularam o desenvolvimento de materiais à base de aluminossilicatos para minimizar os problemas de incêndio, que foram patenteados e patenteados por Davidovits (1999) como geopolímeros. O objetivo foi desenvolver novos materiais poliméricos inorgânicos, não combustíveis e não inflamáveis (DAVIDOVITS, 2002). Os geopolímeros são formados basicamente a partir de fontes de aluminossilicatos com grande quantidade de material amorfo e tamanho de partícula adequado para o processo, portanto, as fontes mais comuns de aluminossilicatos são o metacaulim e as cinzas da combustão do carvão mineral, também classificados como precursores com baixo nível de cálcio. Esses precursores, quando misturados com ativadores alcalinos, especialmente silicatos e hidróxidos de pH elevado, dissolvem materiais amorfos e posteriormente formam uma rede tridimensional de aluminossilicatos (LONGHI, 2015).

Atualmente, a principal classificação dos materiais álcali-ativados é relacionada aos obtidos a partir de precursores de alto teor de cálcio e aqueles obtidos a partir de precursores de baixo teor de cálcio (PROVIS; LUKEY; VAN DEVENTER, 2005).

O processo de ativação alcalina de materiais com alto teor de cálcio ocorre de forma diferente do sistema de ativação alcalina de materiais com baixo teor de cálcio. O mecanismo de reação ocorre em um meio altamente heterogêneo e pode ser resumido em quatro processos: 1) dissolução de partículas precursoras vítreas; 2) nucleação e crescimento da fase sólida inicial; 3) interação e combinação mecânica; e 4) reação contínua em tempos de cura avançados (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014). Neste sistema, a estrutura consiste principalmente em silicato de cálcio e alumínio com alto teor de cálcio. O excesso desse elemento é mais que suficiente para o balanço de carga do alumínio, o que facilita a despolimerização da rede vítrea (DUXON, 2009). O principal produto da reação é o gel de aluminossilicato de cálcio hidratado ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$), que é abreviado como C-A-S-H, semelhante à estrutura de gel formada pela hidratação do cimento Portland, silicato de cálcio hidratado ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$), abreviado C-S-H (PROVIS, 2014; BERNAL *et al.*, 2014).

2.2 Cinzas do carvão mineral

As cinzas volantes são produzidas quando o carvão mineral é queimado em usinas termelétricas ou caldeiras industriais. Em geral, o carvão é pulverizado e soprado na câmara de combustão da caldeira, onde se inflama imediatamente e produz calor pela queima de voláteis e carvão. Inclusões minerais como argila, quartzo e feldspato derretem nesta etapa para formar um resíduo mineral fundido (AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION, 2003). O material fundido é transportado rapidamente para zonas de baixa temperatura. Parte desse material se aglomera e formam cinzas pesadas, enquanto a maioria das partículas finas é transportada junto com o fluxo de exaustão para a formação das cinzas volantes. Tal cinza é removida do gás por separação ciclônica, precipitador eletrostático e filtração através de filtros de mangas (MEHTA; MONTEIRO; 2014).

A composição química da cinza volante normalmente se relaciona com o tipo de carvão do qual é derivada. Os carvões sub-betuminosos e lignitos ocidentais são geralmente ricos em cálcio, em contraste com os carvões betuminosos e antracitos orientais que tendem a ser ricos em alumina e sílica (SCHEETZ; EARLE, 1998). As propriedades físicas, químicas e de engenharia das cinzas volantes de uma determinada instalação originam-se da composição

química da fonte de carvão, seu grau de micronização, condições de queima, métodos de coleta, manipulação e descarte de cinzas.

Putipad *et al.* (2016) destacam que por ser a cinza volante um subproduto da combustão do carvão em usinas termelétricas, é desejável que ela seja reaproveitada em maiores quantidades. Segundo os autores, as cinzas volantes também são conhecidas por sofrerem reações pozolânicas, onde essas reações químicas podem manter a resistência à compressão necessária do concreto usando uma proporção adequada de substituição de cinzas volantes.

Também junto a cinza volante é gerada a cinza pesada. Segundo Livi (2013), a cinza pesada é composta principalmente por sílica, alumina e óxido de ferro, com menores proporções de óxido de cálcio, óxido de magnésio, sulfato e outras combinações. Froener (2016) explicou que a cinza pesada, que representa o segundo resíduo mais relevante da indústria termoelétrica, é quimicamente semelhante à cinza volante, com diferenças fundamentais na presença de contaminantes (metais pesados ou metais voláteis), densidade, tamanho de partícula e, no entanto, essas fases não cristalinas não são utilizadas como adição pozolânica devido ao seu tamanho de partícula mais grosseiro e menor reatividade e, portanto, não tem recebido a atenção que merece na indústria da construção civil.

Sani, Muftah e Muda (2010) apontam que as cinzas são feitas de material grosseiro, poroso, vítreo, granular e incombustível coletado do fundo de um forno de usina termelétrica à carvão. A composição química das cinzas produzidas depende do tipo de forno, do carvão e do processo utilizado na usina termelétrica. Durante o processo de combustão, cerca de 80% do produto se transforma em cinzas volantes e os 20% restantes se transformam em cinzas pesadas.

Entre as vantagens e desvantagens de seu uso, os autores acima acreditam que a baixa reatividade desta cinza é bem conhecida por ser melhorada pelo processamento (por exemplo, moagem e/ou tratamento térmico), e que outra opção para aumentar essa reatividade é combinar o uso com outros precursores mais reativos e/ou quimicamente complementares disponíveis na região.

2.3 Escória de aciaria

A escória de aciaria é o resíduo sólido produzido por reações químicas dentro de reatores metalúrgicos, a partir de matérias-primas específicas (ferro-gusa, sucata e fundente) para obtenção de três produtos principais: aço, escória e gás. A escória é um resíduo sólido produzido, entre outros processos, no convertedor LD (*Linz-Donawitz*) /BOF (*Basic Oxygen Furnace*) (ASSIS, 2015).

A composição química da escória varia em função das matérias-primas utilizadas, do tipo de aço produzido, do processo produtivo, do revestimento do conversor, da forma como a escória é resfriada e como é armazenada (RODRIGUES, 2007), assim como a composição química e mineralógica da escória também é variável. As principais fases minerais presentes na escória são: cal livre (CaO), silicato de cálcio, ferrita de cálcio, wustita (FeO) e a periglásio (MgO) (RAPOSO, 2005).

A principal escória utilizada comercialmente é a escória de alto-forno, amplamente utilizada como adição mineral na produção de cimento Portland. Segundo Provis e Van Deventer (2014), além da escória de alto-forno, existem outros tipos de escória como a escória de forno básico de oxigênio (BOF- Basic Oxygen Furnace), escória do tipo PANELA, a escória tipo conversor (KR) e a escória de forno elétrico (EAF - Eletric Arc Furnace).

Castelo (2004) destacou as diversas utilizações da escória de aciaria como material de construção civil, principalmente como matéria-prima para a produção de cimento, devido à sua composição química que é semelhante ao clínquer de cimento Portland. Há ainda usos como agregado de concreto, apresentando maior resistência à compressão e à abrasão; fundações e componentes de fundação; misturas asfálticas; construção de lastro de leito ferroviário; aterros sanitários e contenção; entre outras aplicações.

Uma característica da escória de aciaria é a expansão de volume que acontece na presença de umidade, oriunda da hidratação tardia da cal livre presente neste subproduto. A expansibilidade da escória pode atingir até 10% do volume inicial causado pelo processo de hidratação em razão da presença de óxidos de CaO e MgO (PARENTE *et al.*, 2003). A expansão de volume da escória prejudica seu uso na indústria cimenteira, porém, segundo Castelo (2004), os efeitos nocivos causados pela cal livre são capazes de serem minimizados quando se utiliza o menor tamanho possível de grão para que ocorra a dissolução completa.

2.4 Bloco vazado modular de concreto (cobogó)

Para Wisnik (2001), a função da utilização de elementos de ordem moderna e vernacular nas edificações, como os blocos vazados, semelhantes ao brise, além de possibilitar a comunicação com o exterior, sua função também era de proteger e sombrear o ambiente. Na década de 1930, o uso de brises encareceu as obras, com isso Luiz Carlos Nunes de Souza, arquiteto e urbanista, juntamente com sua equipe reviveram o uso de blocos vazados, projetando edifícios no Recife com esse elemento oco, sabendo incorporar os princípios expressos pelo

modernismo europeu, como, por exemplo, entre outros, a utilização de novos materiais, estrutura aparente, coberturas planas e grandes superfícies envidraçadas. No entanto, em vez de se limitar a aplicar estas soluções, procurou aperfeiçoar as técnicas do artesanato local e obteve resultados inesperados e de grande importância (COSTA, 2012).

À princípio, os blocos vazados eram construídos de cimento. Posteriormente, em substituição a esse material, optou-se pelo bloco vazado de cerâmica natural, também utilizado pelo arquiteto Lúcio Marçal Ferreira Ribeiro de Lima Costa nos prédios do Parque Guinle, no Rio de Janeiro. Em projetos de edifícios altos, o uso de blocos vazados de cerâmica natural tornou-se constante. Com o tempo, o sistema construtivo dos blocos vazados foi se aprimorando, visto que os desenhos feitos eram exclusivos de algumas obras, como é o caso do edifício Santo Antonio de 1963, projetado pelo arquiteto Acácio Gil Borsoi. Tais elementos foram feitos em concreto armado, responsável pela composição de toda a fachada do edifício (COSTA, 2012).

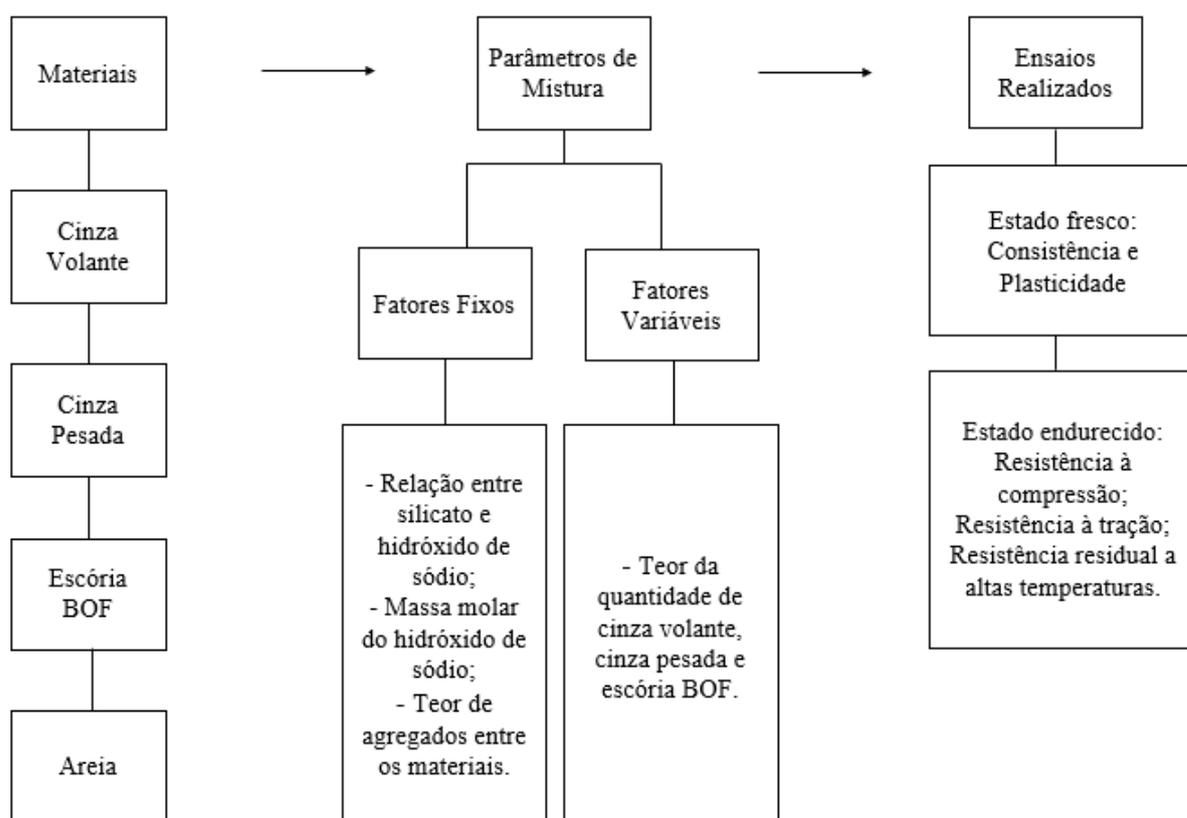
Os blocos vazados podem ser considerados uma das inovações bioclimáticas da arquitetura moderna brasileira. O ar-condicionado estava longe de sua popularidade atual na década de 1930, especialmente no Brasil, onde seu desenvolvimento industrial estava apenas começando. Nesse contexto, era preciso resolver o conforto apenas com a arquitetura. Os cobogós, além de serem elementos de controle ambiental, funcionam também como elementos decorativos, pois podem ter diversos formatos e materiais, dos mais simples aos mais complexos. Assim, com o aumento de sua utilização, desenvolveram-se e passaram a ser produzidos não só a partir do cimento, mas também da cerâmica, cerâmica esmaltada, madeira, entre outros. Além disso, esses elementos têm formas e tamanhos diferentes (VIEIRA; BORBA; RODRIGUES, 2012).

Por fim, vale salientar que segundo Kiritat *et al.* (2016), os blocos vazados controlam a luz e a radiação solar em todas as direções por possuírem elementos de sombreamento vertical e horizontal, além de possuírem alta eficiência de sombreamento, o que é ideal para áreas de clima quente, como o nordeste brasileiro.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção descreve os procedimentos experimentais utilizados nesta pesquisa. Inicialmente, caracterizou-se os materiais utilizados, seguindo-se da definição dos parâmetros de mistura e por fim os testes realizados. A Figura 1 resume a abordagem adotada.

Figura 1 - Procedimento metodológico



Fonte: Autor (2022)

Os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal do Ceará (UFC) - Campus do Pici, Fortaleza-Ce.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados neste estudo foram: cinza volante, cinza pesada, escória BOF, areia natural, hidróxido de sódio - NaOH e silicato de sódio – Na₂SiO₃.

3.1.1 Precursores

A cinza volante e a cinza pesada foram os precursores utilizados e fornecidos pela Usina Termelétrica Energia Pecém, localizada no Complexo Industrial e Portuário do Pecém, em São Gonçalo do Amarante-Ce. Também foi utilizada como precursor a escória BOF, que é produzida pela Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP). A empresa também está localizada no complexo do Pecém.

A caracterização dos precursores foi realizada por meio da determinação da distribuição granulométrica, massa específica, área de superfície específica e composição em porcentagem de massa de óxidos dos precursores. Para o cálculo da massa específica, utilizou-se como base os parâmetros da ABNT NBR 16605 (2017). Tais características foram utilizadas com base nas pesquisas de Araújo (2022) e Costa (2022). Os dados da caracterização tecnológica podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 - Características físicas dos precursores

Característica	Tamanho da Partícula	Cinza Volante	Cinza Pesada	Escória BOF
Distribuição Granulométrica	D10%	1,61 μm	12,49 μm	5,78 μm
	D50%	7,38 μm	70,39 μm	63,38 μm
	D90%	30,50 μm	164,20 μm	158,99 μm
	Dmédio	13,16 μm	82,36 μm	76,05 μm
Massa Específica (g/cm^3)		2,18	1,52	3,13
Área de Superfície Específica (cm^2/g)		4790	1240	3360

Fonte: Araújo (2022); Costa (2022)

A caracterização da composição química dos precursores foi realizada por meio de uma análise de fluorescência de raio-X (FRX) realizada no laboratório de Raio-X do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará no equipamento Rigaku ZSX Mini II. Os dados relacionados à composição em porcentagem de massa de óxidos dos precursores foram baseados nas pesquisas de Araújo (2022), Costa (2022), Nobre *et. al* (2019) e Targino *et. al* (2022), e podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 - Porcentagem da composição em massa de óxidos dos precursores

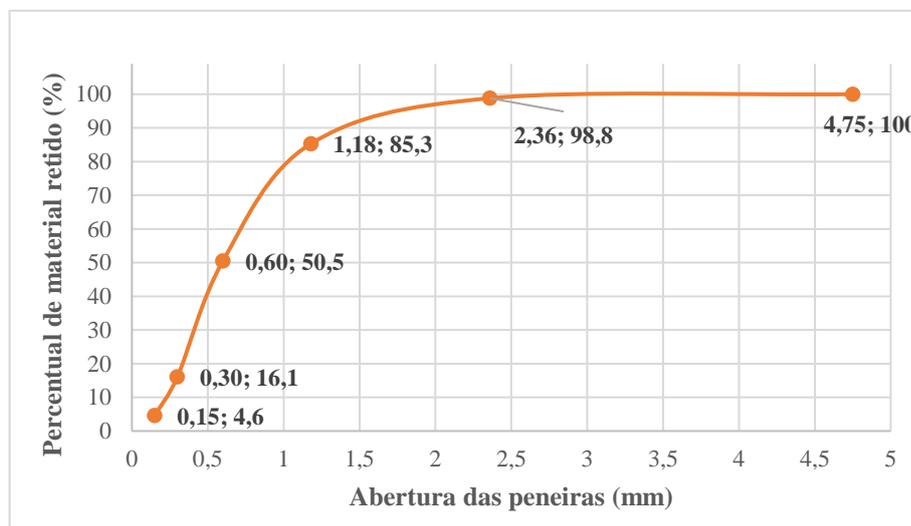
Elementos	Cinza Volante	Cinza Pesada	Escória BOF
Al_2O_3	14,49	10,66	1,94

CaO	9,54	5,61	53,1
CuO	0,11	-	-
Fe₂O₃	24,95	26,99	34,40
K₂O	4,54	3,68	0,14
MgO	-	-	-
MnO	0,17	0,14	2,97
P₂O₃	0,44	-	-
Rb₂O	-	-	-
SiO₂	41,49	50,66	5,64
SO₃	0,29	-	0,83
SrO	0,55	0,43	-
TiO₂	3,26	-	-
ZnO	0,14	-	0,06

Fonte: Araújo (2022); Costa (2022); Nobre *et al.* (2019); Targino *et al.* (2022)

A caracterização da areia natural foi realizada por meio da determinação da distribuição granulométrica, representada na curva granulométrica disposta no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Curva granulométrica da areia natural



Fonte: Autor (2022)

3.1.2 Ativadores

Os ativadores utilizados neste estudo foram o hidróxido de sódio e o silicato de sódio, fabricados pela empresa Gota Química. O hidróxido de sódio manipulado encontrava-se

em estado sólido, com concentração igual a 97,9%. A concentração molar da solução produzida foi igual a 8,0 mols/litro e sua caracterização é detalhada na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização do Hidróxido de Sódio em volume

Parâmetros	8,0 mols/litro
Sólidos totais - NaOH (%)	25,24
H₂O (%)	74,75
Relação H₂O/ NaOH	2,96
Densidade específica (g/cm³)	1,305

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

Utilizou-se o silicato de sódio na forma de solução e sua representação pode ser observada na Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização do Silicato de Sódio

Parâmetros	Resultados
Na₂O (%)	14,38
SiO₂ (%)	31,83
Sólidos totais (%)	46,21
Reação SiO₂/Na₂O (módulo de sílica)	2,21
Densidade específica (g/cm³)	1,583

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

3.2 Métodos de Pesquisa

3.2.1 Parâmetros de mistura

A seleção dos parâmetros de mistura é baseada em Naghizadeh e Ekolu (2019) e Costa (2022) que identificaram os principais fatores que afetam as propriedades dos cimentos álcali-ativados. A composição dos cimentos álcali-ativados teve como referência o trabalho de Costa (2022) para a elaboração de novas composições. Desse modo, manteve-se fixos os ativadores e a relação entre ativadores 1:1 (silicato: hidróxido); massa molar do hidróxido de sódio de 8 mol/l, e o agregado miúdo (areia natural). Variou-se o tipo de precursor e as proporções entre eles. A relação da solução ativadora/precursor foi de 0,6 para os traços T1 e T3. Para o traço T2 a relação da solução ativadora/precursor foi de 0,8. Portanto, foram

produzidas três argamassas, denominadas de T1 (70% Cinza Volante, 30% Escória BOF); T2 (50% Cinza Pesada, 50% Escória BOF) e T3 (20% Cinza Pesada, 40% Cinza Volante, 40% Escória BOF), como especificadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Quantidade de materiais dos traços T1, T2 e T3

Material	Quantidade em gramas (T1)	Quantidade em gramas (T2)	Quantidade em gramas (T3)
Cinza Pesada	0,0 g	1125,0 g	450,0 g
Cinza Volante	1575,0 g	0,0 g	900,0 g
Escória BOF	675,0 g	1125,0 g	900,0 g
Areia natural	5962,5 g	5962,5 g	5962,5 g
Hidróxido de Sódio	675,0 g	900,0 g	675,0 g
Silicato	675,0 g	900,0 g	675,0 g

Fonte: Autor (2022)

A variação da relação ativador/precursor de 0,6 para 0,8 para o traço T2, deu-se com o objetivo de melhorar a consistência da pasta de argamassa, visto que a relação solução/precursor de 0,6 não promoveu trabalhabilidade para a realização dos ensaios e posteriormente o molde dos corpos de provas e blocos vazados.

3.2.2 *Ensaio realizados*

O ensaio de avaliação de desempenho no estado fresco foi o espalhamento na mesa de consistência, conforme a ABNT NBR 13276 (2016), como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Ensaio de consistência e plasticidade



Fonte: Autor (2022)

Para cada traço confeccionou-se 02 cobogós em fôrmas com dimensões 10 cm de altura x 24 cm de largura x 24 cm de comprimento para avaliação da resistência à compressão, conforme ABNT NBR 13279 (2005). Também se confeccionou 03 corpos de prova prismáticos em fôrmas com dimensões 4 cm de altura x 4 cm de largura x 16 cm de comprimento, para avaliação da resistência à tração na flexão e resistência à compressão, conforme norma ABNT NBR 13279 (2005). E 03 corpos de prova cúbicos em fôrmas com dimensões 4 cm de altura x 4 cm de largura x 4 cm de comprimento para avaliação da resistência residual após sofrer altas temperaturas e resistência à compressão.

Figura 3 - Fôrmas e moldagem finalizada dos blocos vazados e corpos de prova



Fonte: Autor (2022)

Ao todo, foram reproduzidos 06 blocos, 09 corpos de prova prismáticos e 09 corpos de prova no formato cúbico. O processo de cura deu-se em temperatura ambiente até o dia da realização dos ensaios no estado endurecido. O processo de desmoldagem aconteceu 24 horas após seu processo de fabricação. A Figura 4 mostra o ensaio de resistência à compressão axial no bloco na idade de 28 dias, conforme a ABNT NBR 13279 (2005), com velocidade de aplicação de carga igual a 500 N/s. O ensaio foi realizado na Máquina Universal de Ensaio EMIC DL com capacidade de 300 KN no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC-UFC. É válido salientar que não se realizou a fase de capeamento dos blocos como previsto na norma em uso para a realização do teste de resistência à compressão axial.

Figura 4 - Ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Autor (2022)

A Figura 5 apresenta o ensaio de resistência à tração na flexão e de resistência à compressão na idade de 28 dias, respectivamente, conforme a ABNT NBR 13279 (2005), realizado no estado endurecido.

Figura 5 - Ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão a) flexão; b) compressão



Fonte: Autor (2022)

O ensaio de resistência residual após a exposição a altas temperaturas foi realizado baseado no trabalho de Lu e Poon (2012). Aos 28 dias, os corpos de prova cúbicos foram transferidos para a estufa a 105° C por 8 h para remover a umidade. Em seguida, os corpos de prova foram aquecidos em um forno mufla a uma taxa de aquecimento de 5° C/min da temperatura ambiente até 800 ° C. Após um período de espera de 2 h, o forno foi desligado e os corpos de prova foram resfriados no forno, como mostra a Figura 6.

Figura 6 – Representação dos corpos de prova no forno mufla após sofrer altas temperaturas



Fonte: Autor (2022)

Após o resfriamento foi realizado o ensaio de resistência à compressão. Em seguida foi calculado o índice de resistência residual (RSI), conforme a Equação (1):

$$RSI = S_r/S_i \times 100\% \quad \text{Equação 1}$$

Onde: S_r é a resistência à compressão dos corpos de prova após aquecimento a 800° C e S_i é a resistência à compressão dos corpos de prova após 28 dias de cura (sem exposição a 800° C). O RSI foi empregado neste estudo para avaliar a resistência a altas temperaturas, que pode ocorrer em estruturas reais em condições de incêndio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

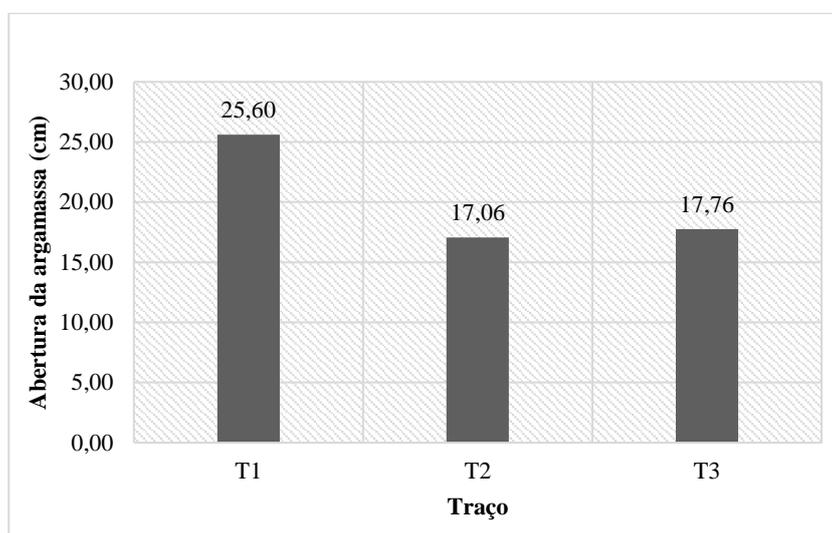
Esta seção descreve os resultados obtidos nos ensaios realizados no estado fresco e endurecido nos blocos e corpos de prova produzidos, assim como, a análise e a discussão desses resultados.

4.1 Propriedades no estado fresco

4.1.1 Ensaio de Consistência e Plasticidade (Flow Table Test)

No Gráfico 2 são apresentados os resultados do ensaio de consistência e plasticidade.

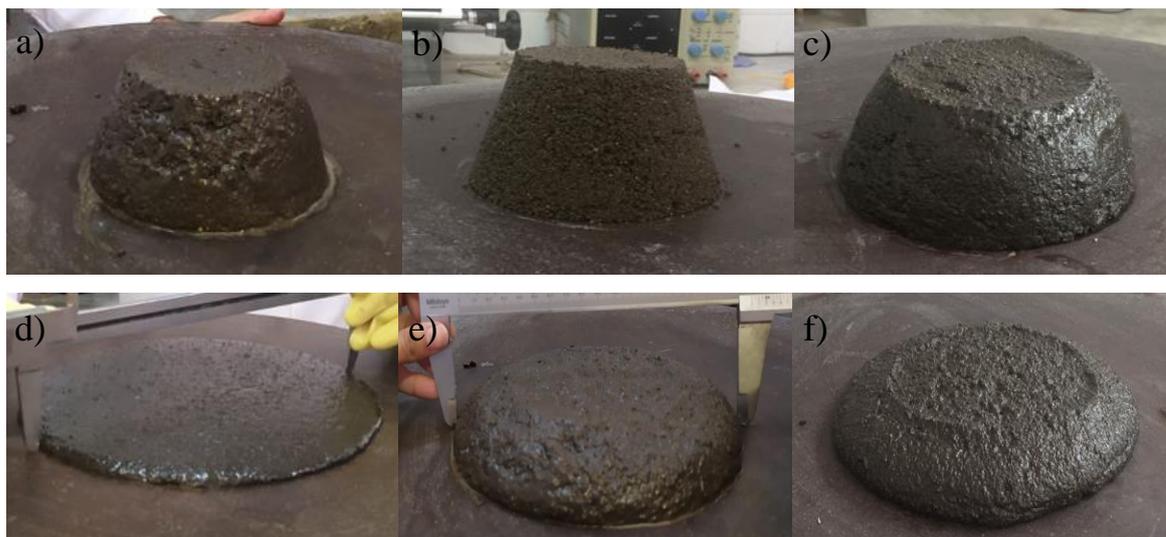
Gráfico 2 - Resultados de Consistência e Plasticidade pelo Flow Table Test



Fonte: Autor (2022)

Conforme o Gráfico 2, percebe-se que o traço T1 (composto por 70% cinza volante e 30% escória BOF) obteve o maior diâmetro entre os traços testados. Seguido pelo traço T3 (composto por 20% cinza pesada, 40% cinza volante e 40% escória BOF) e traço T2 (composto por 50% cinza pesada e 50% escória BOF). Nas Figuras 7-a, 7-b e 7-c é observado o formato da argamassa produzida de cada traço após o levantamento do tronco de cone utilizado no ensaio e após as 30 quedas previstas na NBR ABNT 13276 (2016), para os traços T1, T2 e T3, respectivamente, nas Figuras 7-d, 7-e e 7-f.

Figura 7 - Argamassa após levantamento do mini-cone a) T1; b) T2; c) T3.
Espalhamento após 30 quedas d) T1; e) T2; f) T3.



Fonte: Autor (2022)

Conforme a literatura, a trabalhabilidade é diretamente dependente da relação água/cinza volante, razão ativador/cinza volante e razão hidróxido de sódio: silicato de sódio (Gomaa *et al.* 2017). Contudo, para os traços T1 e T3 manteve-se constante todos esses parâmetros, desse modo, verificou-se que o T1 apresentou melhor trabalhabilidade. Esse comportamento foi observado no trabalho de Costa (2022), que ao incorporar a escória BOF em pastas de cinza volantes verificou a melhoria na trabalhabilidade.

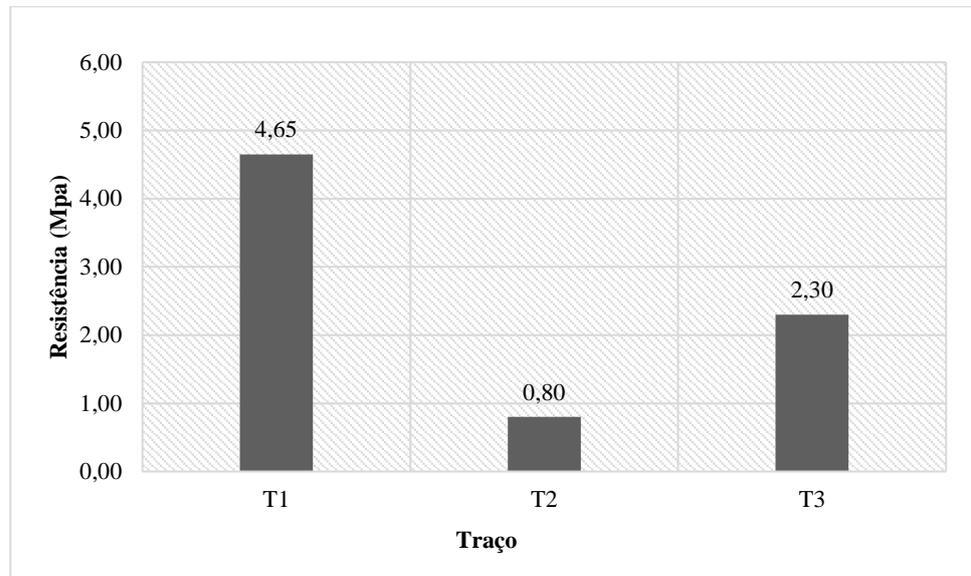
Por outro lado, o traço T2 com 50% de cinza pesada e 50% de escória BOF apresentou trabalhabilidade relativamente menor, mesmo com a maior relação entre solução ativadora e precursor. Isso pode estar associado às partículas de cinza pesada que de acordo com a literatura, são caracterizadas por serem porosas e irregulares (LONGHI, 2015). Tais características favorecem a absorção do líquido da pasta fresca, diminuindo assim a sua trabalhabilidade (SATHONSAOWAPHAK; CHINDAPRASIRT; PIMRAKSA, 2009).

4.2 Propriedades no estado endurecido

4.2.1 Características mecânicas das argamassas e dos blocos

A resistência à compressão dos cobogós foi realizada após a cura em temperatura ambiente na idade de 28 dias. No Gráfico 3 é possível analisar os resultados desse ensaio.

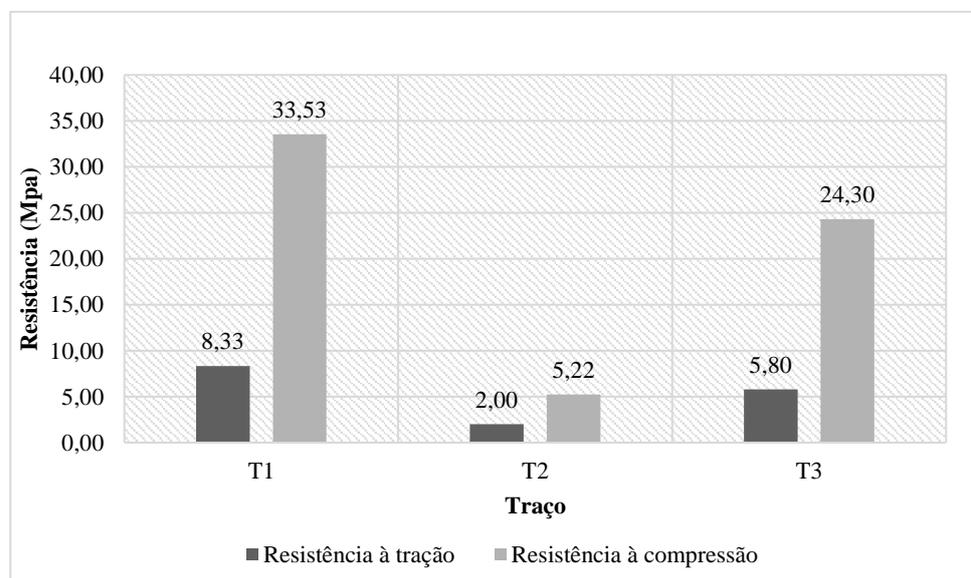
Gráfico 3 - Resistência à compressão axial dos blocos vazados



Fonte: Autor (2022)

A resistência à tração na flexão e a resistência à compressão de corpos de provas é apresentada no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Resistência média à tração e à compressão dos corpos de provas



Fonte: Autor (2022)

Conforme o Gráfico 3, percebe-se que o traço T1 apresentou a maior resistência à compressão entre os traços testados. Tal comportamento foi observado no trabalho de Costa (2022), que ao adicionar a escória BOF junto de cinza volante, atingiu boas resistências à compressão aos 28 dias. Em seguida, têm-se o traço T3, que também tem em sua composição

cinza volante e escória BOF em menores proporções que T1. Essa argamassa também contém cinza pesada, o que pode ter contribuído para resistência 49,5% menor que T1. De acordo com Costa (2022), a cinza volante é mais reativa e apresenta melhores resistências dentre os materiais testados. Além disso, a adição de cinza volante com elevada finura pode contribuir significativamente para a resistência por meio do efeito fíler, que se caracteriza pelo preenchimento dos vazios e proporciona maior refinamento dos poros da argamassa (KADRI *et al.*, 2010; RUPASINGHE *et al.*, 2017).

A combinação entre cinza volante e escória BOF propicia o desenvolvimento de compostos à base de cálcio (C-S-H e C-A-S-H) devido à grande quantidade de CaO presente na escória BOF, que são responsáveis pelo aumento da resistência mecânica por meio do preenchimento dos vazios da microestrutura (SAMANTASINGHAR, SINGH, 2019).

O aumento da relação entre ativador e precursor no traço T2 levou a uma diminuição da resistência à compressão. Isso era esperado de acordo com Duxon *et al.* (2005), pois um aumento da relação entre ativador e precursor contribui para o aumento na porosidade. Ainda nesse sentido, o traço T2 é composto por dois precursores menos reativos (cinza pesada e escória BOF) segundo Boca Santa, Soares e Riella (2016). Além disso, as partículas de cinza pesada e escória BOF possuem tamanhos 6X maiores comparados à cinza volante (Tabela 2).

É importante destacar que não existe uma norma específica para esse tipo de bloco. Por isso, considerou-se a norma *ABNT NBR 6136 (2016) - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos*, para checagem do desempenho dos blocos produzidos neste estudo. Observa-se que os blocos vazados sem função estrutural, de acordo com a norma, devem ter resistência mínima de 3,0 MPa. Portanto, apenas o bloco vazado do traço T1 apresentou resistência acima do estipulado.

É válido ressaltar que um bloco do traço T2 e um bloco do traço T3 fragmentaram-se no processo de desmoldagem após 24 horas, pois ainda apresentavam aspecto plástico (Figura 8).

Figura 8 – Representação dos blocos vazados fragmentados T2 e T3



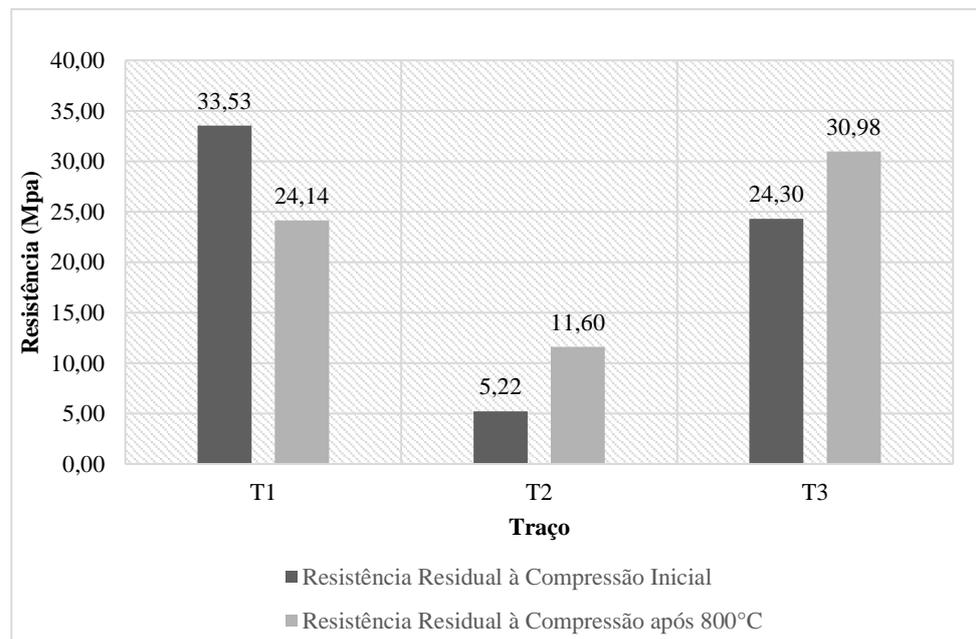
Fonte: Autor (2022)

O não enrijecimento em 24 horas pode ser atribuído à presença de cinza pesada. Esse precursor, possivelmente necessita de um maior tempo de cura para a realização de sua desmoldagem, visto que, o processo de desmoldagem do traço T1 sem a presença de cinza pesada aconteceu sem fragmentação dos blocos.

Conforme o Gráfico 4, percebe-se que o traço T1 (composto por 70% cinza volante e 30% de BOF) apresentou a maior resistência à flexão e à compressão entre os traços testados. Em seguida, têm-se o traço T3 (composto por 20% cinza pesada, 40% cinza volante, 40% de BOF). Tal fato se justifica e está de acordo com os trabalhos de Costa (2022) e Samantasinghar, Singh (2019), como já discutido anteriormente.

A resistência residual após sofrer altas temperaturas dos corpos de prova cúbicos está apresentada no Gráfico 5.

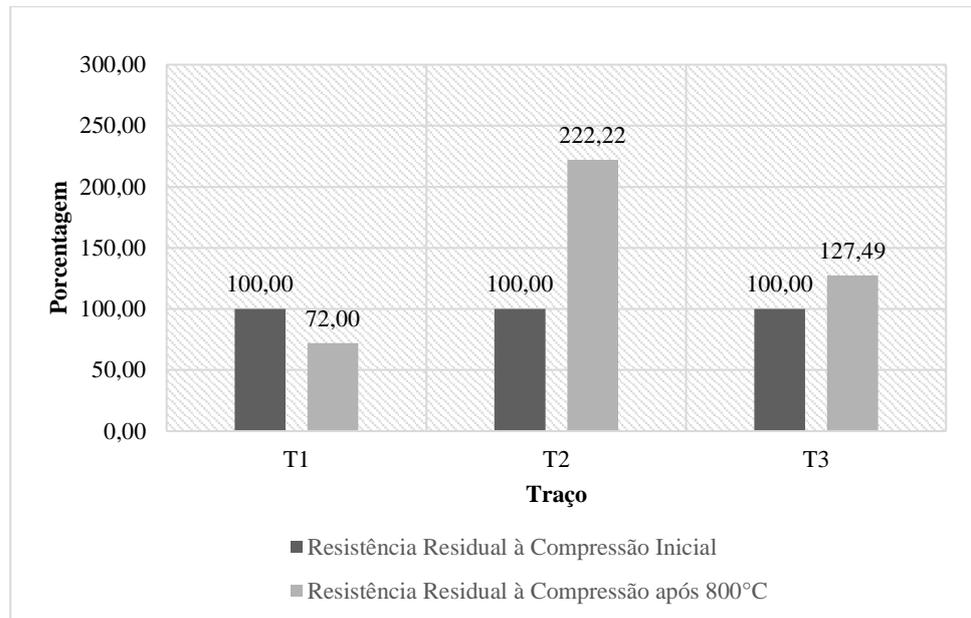
Gráfico 5 - Resistência residual após altas temperaturas



Fonte: Autor (2022)

A resistência residual em porcentagem após sofrer altas temperaturas dos corpos de prova cúbicos está apresentada no Gráfico 6.

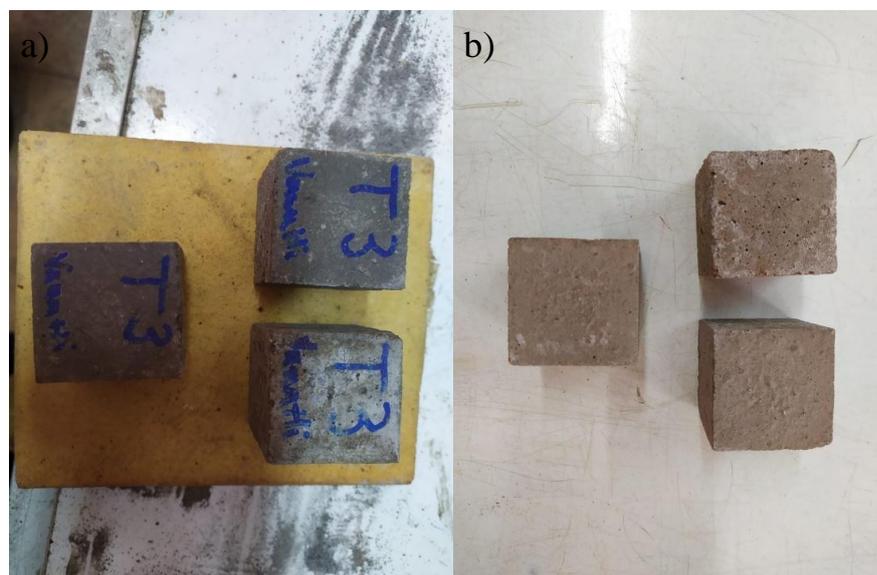
Gráfico 6 - Resistência residual após altas temperaturas em porcentagem



Fonte: Autor (2022)

Conforme os Gráficos 5 e 6, percebe-se que o traço T2 (composto por 50% cinza pesada e 50% de BOF) apresentou a maior resistência residual entre os traços testados. Em seguida, têm-se o traço T3 (composto por 20% cinza pesada, 40% cinza volante e 40% de BOF). Por último tem-se o traço T1 (composto por 70% cinza volante e 30% de BOF) que teve diminuição da resistência. Ainda, analisando-se os valores de resistência residual encontrados, todos os traços mantiveram-se íntegros após 800°C, mudando apenas sua colocação de tom cinza para tom avermelhado, conforme Figura 9.

Figura 9 – Análise visual da coloração dos corpos de prova após 800°C: a) tom cinza; b) tom avermelhado.



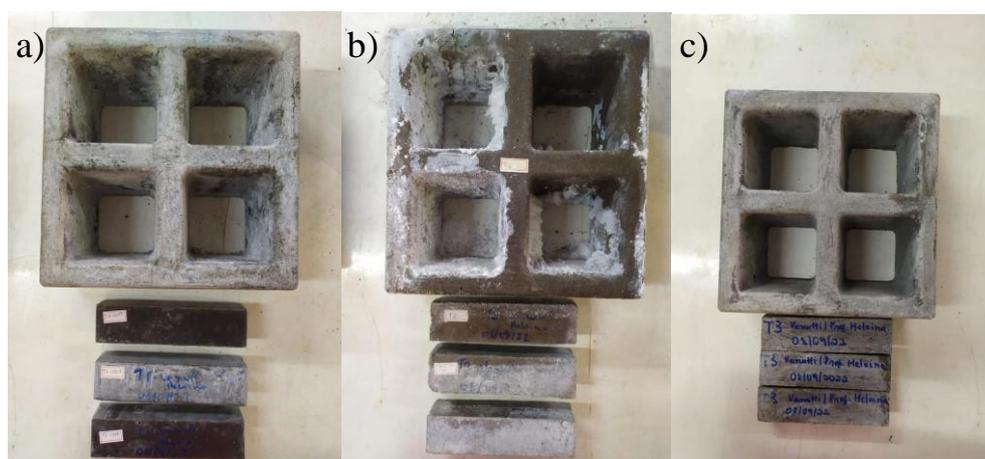
Fonte: Autor (2022)

Tais resultados estão de acordo com os encontrados por Ling *et. al* (2012), que concluíram que a alteração das propriedades a 800°C não teve efeito significativo na degradação da resistência dos corpos de prova preparados com incorporação dos materiais precursores e ativadores descritos anteriormente, apesar da diminuição da resistência de T1. Ao contrário, a utilização desses materiais tende a melhorar a resistência após altas temperaturas. Tal efeito benéfico pode ser explicado pela menor incompatibilidade térmica entre as matrizes das pastas estudadas.

4.3 Eflorescência

Durante o processo de cura identificou-se a presença de eflorescência nos corpos de prova e blocos produzidos. Aos 28 dias realizou-se o registro fotográfico de todas as faces dos corpos de prova e blocos a fim de identificar aquelas com maiores incidências de sais.

Figura 10 – Análise visual de eflorescência dos corpos de prova e blocos: a) T1; b) T2; c) T3



Fonte: Autor (2022)

A eflorescência em materiais álcali-ativados à base de cinza volante está relacionada ao tipo de solução ativadora, temperatura de cura e teor de cálcio, onde a porosidade contribui de forma direta na migração dos álcalis (Zhuang *et al.* 2016). Segundo Longhi *et al.* (2019) acontece uma reação química entre álcalis lixiviados livres com o CO₂ em uma estrutura porosa, ocorrendo assim a possibilidade de os álcalis livres serem transportados. Segundo Provis e Van Deventer (2009), Fernández-Jiménez, Palomo e Revuelta (2009) os materiais álcali-ativados com uma alta concentração de soluções ativadoras (geralmente hidróxidos) ocorrendo uma reação do álcali com CO₂ atmosférico, nem sempre é prejudicial, entretanto em alguns casos acontece o aumento da eflorescência, aumentando assim sua fragilidade.

É necessário aprofundar o estudo da eflorescência, desde sua estrutura porosa, reações químicas, umidade, modo de moldagem e processo de carbonatação. Para utilizar o material como alternativa ao cimento Portland, é necessário entender o fenômeno para que não afete a resistência mecânica e a durabilidade.

Vale destacar que nos blocos feitos convencionais nas indústrias de pré-moldados de blocos vazados é utilizada a impermeabilização, essa opção pode ser adotada nos blocos à base de cimentos álcali-ativados, eliminando a formação de eflorescência.

5 CONCLUSÃO

Foram avaliados blocos não estruturais para paredes vazadas (cobogós) a partir de argamassas produzidas com cimento álcali-ativado. As propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas composta por cinza volante, cinza pesada e escória BOF também foram avaliadas, e as principais conclusões podem ser listadas a seguir:

- O melhor índice de consistência e plasticidade foi observado no traço T1, produzido com o cimento composto pelo binário de cinza volante e escória BOF, com o espalhamento na mesa de consistência igual a 25,60 cm, seguido pelo traço T3, mistura ternária de cinza volante, escória BOF e cinza pesada, e por fim, traço com o cimento composto pelo binário escória BOF e cinza pesada.
- No ensaio de resistência à compressão dos cobogós, o traço T1 apresentou a maior resistência à compressão entre os traços testados. Utilizando como referência a norma *ABNT NBR 6136 (2016) - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos*, observou-se que apenas o bloco vazado do traço T1 apresentou resistência acima do estipulado de 3,0 MPa.
- Nos ensaios de resistência à tração e compressão dos corpos de prova, o traço T1 apresentou a maior resistência à flexão e à compressão, corroborando com o comportamento apresentado pelos blocos testados.
- No ensaio de resistência residual após altas temperaturas, o traço T2 apresentou um aumento na resistência à compressão em torno de 122,2% em relação à resistência obtida nos corpos de prova curados em temperatura ambiente. Por fim, todos os traços mantiveram-se íntegros após 800°C, mudando apenas sua coloração de tom cinza para tom avermelhado.

De modo geral, a produção de blocos vazados com uso de cimento álcali-ativado mostra-se viável, utilizando como precursor a cinza volante e a escória BOF. No entanto, destaca-se que a cinza pesada deve ser avaliada sob diferentes condições de cura.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

- Realizar a avaliação do ciclo de vida do bloco vazado de cimento álcali-ativado
- Analisar as condições de cura da cinza pesada
- Estudar a eflorescência e uma forma de solucionar esse fenômeno

REFERÊNCIAS

ACAA (AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION). **Fly Ash Facts for Highway Engineers**. Edição 4. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2016.

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

AHMARUZZAMAN, M. **A review on the utilization of fly ash**. *Progress in energy and Combustion Science*. v. 36, n. 6, p. 327-363, 2010.

BLUMENSCHNEIN, R. N.; MAURY, M. B. **Produção de cimento: impactos à saúde e ao meio ambiente**. *Sustentabilidade em Debate*, Brasília, v. 3, n. 1, p. 75-96, jan/jun 2012. . Disponível:
<https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/12110/1/ARTIGO_ProducaoCimentoImpacto.pdf> Acesso em 02 out. 2022.

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.

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**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2021.

CANTARELLI, Gustavo Martins. **Percolação de Água em Protótipos de Concreto com Elevados Teores de Escória e Cinza Volante com Adição de Cal**. 2007. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro de Tecnologia. Santa Maria. 2007. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1592>. Acesso em 18 maio. 2022.

CASTELO BRANCO, Verônica Teixeira Franco. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. 2004. 135 f. Dissertação de M. Sc, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Engenharia Civil, Rio de Janeiro.

CEZAR, Daiana de Souza. **Características de Durabilidade de Concretos com Cinza Volante e Cinza de Casca de Arroz com e sem Beneficiamento**. 2011. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro de Tecnologia. Santa Maria. 2011.

COSTA, A.A.A. **Arquitetura do sol: soluções climáticas produzidas em Recife nos anos 50**. Vitruvius: arquitetos, v.13,2012. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/13.147/4446>>.16 nov. 2022

COSTA, H. N. da. **Cimento álcali ativado à base de cinzas do carvão mineral e escória de aciaria**. 2020. (Tese em publicação). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais. Universidade Federal do Ceará, 2022.

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

CRUZ, E. B. et.al. **Tratamento pirometalúrgico de escórias de aciaria a oxigênio Destinado à construção civil e fluxos de refino**. Trabalho apresentado ao 31º Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais da ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 527-540 p. Vitória, Espírito Santo. 2000.

DAVIDOVITS, J. **Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology**. The Geopolymere '99 International Conference, 1999.

DAVIDOVITS, P. J. **30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications . Market Trends and Potential Breakthroughs . Geopolymer 2002 Conference**, p. 1–16, 2002.

DUXSON, P. ; PROVIS, J.L. . LUKEY, G.C.; SEPAROVIC, F .J.; DEVENTER, VAN. **Study of structural ordering in aluminosilicate geopolymer gels**. Langmuir, vol.21, p.3028-3036, 2005.

DWIVEDI, Aakash; JAIN, Manish Kumar. **Fly ash–waste management and overview: A Review**. Recent Research in Science and Technology, v. 6, n. 1, 2014.

DYK, T. S. N. C. M. S. L. D. V. **Basic oxygen furnace slag: Review of current and**

potential uses. Minerals Engineering, ScienceDirect, v. 149, n. 1, p. 106234, abr./2020.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; REVUELTA, D. **Alkali activation of industrial by-products to develop new Earth-friendly cements.** 11th International Conference on Non-conventional Materials And Technologies (NOCMAT 2009), Bath, UK. CD-ROM proceedings, n. September, p. 6–9, 2009.

FREEWAN, A. A. Y. **Impacto f external shading devices on termal and daylighting performance of offices in hot climate regions.** Solar Energy, v. 102, p. 14-30, 2014.

FROENER, M. S. **Valorização de Cinza de Fundo por meio da Síntese de Ligantes Geopoliméricos: Otimização de Traços em Pasta e Avaliação dos Sistemas em Argamassas.** 2016. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

GEYER, R. M. T.; DAL MOLIN, D.; VILELA, A.C. **Caracterização e aplicações das escórias siderúrgicas na indústria da construção civil.** In: V ENCONTRO REGIONAL SOBRE MEIO AMBIENTE NA SIDERÚRGICA e SEMINÁRIO SOBRE GESTÃO AMBIENTAL NA SIDERÚRGIA. 1995, Vitória, ES. p.44-79.

HA, J., CHAE, S., CHOU, K. W., et al., **“Characterization of class F fly ash using STXM: identifying intraparticle hererogeneity at nanometer scale”**, Journal of Nanomaterials, 2016.

HADI, M. N. S.; AL-AZZAWI, M.; YU, T. **Effects of fly ash characteristics and alkalineactivator components on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar.** Construction and Building Materials, v. 175, p. 41–54, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.092>.

HUYNH, Trong-Phuoc; VO, Duy-Hai; HWANG, Chao-Lung. **Propriedades de engenharia e durabilidade de argamassa ecologicamente correta com ligante SRF isento de cimento.** Construção e Materiais de Construção, v. 160, p. 145-155, 2018.

IPCC. **Climate change 2014: synthesis report.** Genebra, 2014.

JESEMBAYEVA, A., SALEM, T., JIAO, P., HOU, B., & NIYAZBEKOYA, R. (2020). **Cimento misturado com Escória de Aciaria de Oxigênio Básico (BOF) como alternativa de material de construção verde ativo.** Materiais, 13 (14), 3062.

JOSHI A, et al. (2010) **Characterizing regulatory path motifs in integrated networks using perturbational data.**

KADRI, E. H. et al. **Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration.** Materials and Structures, v. 43, n. 5, p. 665–673, 2010.

KIRIMTAT, A.; KOYUNBABA, B.K.; CHATZIKONSTANTINO, L.; SARIYILDIZ, S. R. Review of simulation modeling for shading devices in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 23-49, 2016. Disponível em: <http://ac.elscdn.com/S1364032115008667/1-s2.0-S1364032115008667-main.pdf?_tid=4efaf1b2-3ef5-11e6-af23-0000aacb360&acdnat=1467313579_9f8277f4eb4e5b78292b14d109b309cf>. Acesso em: 16 nov. 2022.

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

LEAL, Márcio Manuel Rodrigues. **Desenvolvimento de argamassas de revestimento com comportamento térmico melhorado**. 2012. 215f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal, 2012.

LIMA, Lucas Pereira. **Avaliação de argamassa geopolimérica à base de cinza volante**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2020.

LIU, D. et al. **Bamboo fiber and its reinforced composites: structure and properties**. **Cellulose**, v. 19, p. 1449-1480, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-012-9741-1>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10570-012-9741-1> Acesso em: 3 dez. 2022.

LIU, W. J. J. L. X. **Impact of Carbon Quota Allocation Mechanism on Emissions Trading: An Agent-Based Simulation**. MDPI, Sustainability, v. 8, n. 826, p. 8, ago./2016.

LIVI, C. N. **Desenvolvimento de pasta de geopolímeros a base de cinza volante e hidróxido de sódio**. 2013. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

LONGHI, M. A. **Álcali-Ativação De Lodo De Caulim Calcinado E Cinza Pesada Com Ativadores Convencionais E Silicato De Sódio Alternativo**. 2015. (Dissertação). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

LONGHI, M., GAEDKE, F., RODRÍGUEZ, E., PASSUELLO, A., KIRCHHEIM, A.P., BERNAL, S., PROVIS, J., 2014. **Geopolymers based on calcined kaolin sludge/ bottom ash blends and an alternative sodium silicate activator**, in: 34th Cement and Concrete Science Conference. Sheffield. United Kingdom, p. 182.

LOTTHENBACH, B., SCRIVENER, K. e HOOTON, RD (2011) **Materiais Cimentícios Suplementares**. Cement and Concrete Research, 41, 1244-1256.

L.Y. Daniel, Kong, Jay G. Sanjayan, **Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures**, Cem. Concr. Compos. 30 (2008) 986–991.

MALONE, P. G.; RANDALL, C. A. **Potential applications of alkali-activated aluminosilicate binders in military operations**. Department Of The Army Assistant Secretary Of The Army (R&D) [s.l: s.n.]

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. Nova York: McGraw-Hill, 2006.

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

MONTEIRO, P., MILLER, S. & HORVATH, A. **Rumo ao concreto sustentável**. *Natureza Mater* 16, 698-699 (2017).

NAIDU, T.S., DYK, L.D. VAN, SHERIDAN, C.M., GRUBB, D.G., 2018. **Passive acid mine drainage remediation using BOF steel slag and sugarcane bagasse**. In: N. Theodossiou, C.

NAGHIZADEH, A.; EKOLU, S. O. **Method for comprehensive mix design of fly ash geopolymer mortars**. *Construction and Building Materials*, v. 202, p. 704–717, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.185>.

NEVILLE, Adam Matthew. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI, 1982. 738 p

OLIVEIRA, Andrielli Morais de. **Avaliação do Desempenho de Concretos com Adições Minerais Quanto a Corrosão das Armaduras Induzida por Cloretos**. 2007. 276 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia. Goiânia. 2007. Disponível em: <<http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tde/673>>. Acesso em 18 maio. 2022.

PARENTE, Everton Bezerra; BOAVISTA, Álvaro Holanda; SOARES, Jorge Barbosa. **Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas de Solo e Escória de Aciaria para aplicação na Construção Rodoviária na Região Metropolitana De Fortaleza**. XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET. 2003.

PETRY, Simone Bassan. **Estudo da Permeabilidade à Água na Camada de Cobrimento de Protótipos de Concretos com Altos Teores de Cinza Volante**. 2004. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia. Santa Maria. 2004. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1642>. Acesso em 18 maio. 2022.

PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? a reexamination of existing results**. *Chemistry of Materials*, v. 17, n. 12, p. 3075–3085, 2005.

PROVIS, John L.; PALOMO, Anjo; SHI, Caijun. **Avanços na compreensão de materiais ativados por álcalis**. *Pesquisa de Cimento e Concreto*, v. 78, p. 110-125, 2015.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, S. J. **Geopolymers - Structure, processing, properties and industrial applications.** [s.l: s.n.]

PUTHIPAD, N.; OUCHI, M.; RATH, S.; ATTACHAIYAWUTH, A. **Enhancement in selfcompactability and stability in volume of entrained air in self-compacting concrete with high volume fly ash.** *Construction and Building Materials*, v. 128, p. 349-360, 2016.

RODRIGUES, G. L. C. **Caracterização e avaliação da expansibilidade de escórias de aciaria LD não tratadas e tratadas.** Universidade Federal do Espírito Santos, Vitória, Espírito Santos, 2007.

SACILOTO, Adriano Pedroso. **Comportamento Frente à Ação de Cloretos de Concretos Compostos com Adições Minerais Submetidos a Diferentes Períodos de Cura.** 2005 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Ciências Rurais. Santa Maria. 2005. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=346>. Acesso em 18 maio. 2022.

SAMANTASINGHAR, Subhashree; SINGH, Suresh Prasad. **Fresh and hardened Properties of fly ash–slag blended geopolymer paste and mortar.** *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 13, n. 1, p. 1-12, 2019.

SANI, M. S. H. M.; MUFTAH, F.; MUDA, Z. **The Properties of Special Concrete Using Washed Bottom Ash (WBA) as Partial Sand Replacement.** *International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology*, v. 1, n. 2, p. 65-76, 2010.

SATHONSAOWAPHAH, 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.

SEVERO, C. G. S. et al. **Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente.** *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 82, p. 55–67, 2013. Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revistaremap/index.php/REMAP/article/viewFile/334/276>.

SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F.; PALOMO, A. **New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement.** *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 7, p. 750–763, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>.

TARGINO, L. D.; ARAUJO, L.B.; PAIVA, A.; COSTA, H.N.; BABADOPULOS, L.; CABRAL, A.E.B. **Concretos sustentáveis com aglomerantes geopoliméricos e agregados**

de escória de aciaria BSSF: caracterização mecânica e análise de impacto ambiental. Trabalho em desenvolvimento (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

T.C. Ling, C.S. Poon, S.C. Kou, **Influence of recycled glass content and curing conditions on the properties of self-compacting concrete after exposure to elevated temperatures**, Cem. Concr. Compos. 34 (2012) 265–272.

VIEIRA, A.; BORBA, C.; RODRIGUES, J. **Cobogó de Pernambuco**. Recife, 2012. Disponível em: <<http://cobogodepernambuco.com/wp-content/uploads/2013/07/Pesquisa-Cobogo-de-Pernambuco.pdf>>. Acesso em 16 nov. 2022

Wang, P., Liang, S., Chen, C., Xie, X., Chen, J., Liu, Z., ... & Zhou, J. (2022). **Spontaneous Construction of Nucleophilic Carbonyl-Containing Interphase toward Ultrastable Zinc-Metal Anodes**. *Advanced Materials*, 34(33), 2202733.

WISNIK, G. **Lúcio Costa**. São Paulo: Cosac & Naify, 2001.128 p.

XIE, Tianyu; OZBAKKALOGLU, Togay. **Comportamento de concreto geopolimérico com baixo teor de cálcio e cinzas de fundo curado à temperatura ambiente**. *Ceramics International*, v. 41, n. 4, pág. 5945-5958, 2015.

ZHUANG, X. Y. et al. **Fly ash-based geopolymer: Clean production, properties and applications**. *Journal of Cleaner Production*, v. 125, p. 253–267, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.019>.

APÊNDICE A – FLOW TABLE TEST

Traço 1	Medidas (cm)	Média (cm)
	24,80	25,60
	25,80	
26,30		
Traço 2	Medidas (cm)	Média (cm)
	17,00	17,06
	17,00	
17,20		
Traço 3	Medidas (cm)	Média (cm)
	18,00	17,76
	17,80	
17,50		

APÊNDICE B – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS BLOCOS VAZADOS

Blocos	Resistência (Mpa)	Média (Mpa)	Traço
CP1	4,60	4,65	T1
CP2	4,70		
CP3	0,80	0,8	T2
CP4	2,30	2,3	T3

APÊNDICE C – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO DOS CP'S PRISMÁTICOS

Corpos de prova	Resistência à tração (Mpa)	Média (MPa)	Traço
CP1	8,00	8,33	T1
CP2	8,40		
CP3	8,60		
CP4	2,00	2,00	T2
CP5	2,20		
CP6	1,80		
CP7	5,70	5,80	T3
CP8	5,90		
CP9	5,80		

Corpos de prova	Resistência à compressão (Mpa)	Média (MPa)	Traço
CP1	32,35	33,53	T1
CP2	33,48		
CP3	34,75		
CP4	5,04	5,22	T2
CP5	5,15		
CP6	5,47		
CP7	22,70	24,3	T3
CP8	24,73		
CP9	25,47		

APÊNDICE D – RESISTÊNCIA RESIDUAL

Resistência após 800 °C (MPa)	Média (MPa)	Traço
22,68	24,14	T1
25,61		
11,79	11,60	T2
11,42		
30,75	30,98	T3
31,22		

Resistência Inicial (MPa)	Média (MPa)	Traço
32,35	33,53	T1
33,48		
34,75		
5,04	5,22	T2
5,15		
5,47		
22,70	24,30	T3
24,73		
25,47		

Resistência Residual à Compressão Inicial	Resistência Residual à Compressão após 800°C
100,00	72,00
100,00	222,22
100,00	127,49