

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

THAIS MAYARA BONELLI

DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS COM ADIÇÃO DE
CINZA DE CASCA DE ARROZ

Joinville

2022

THAIS MAYARA BONELLI

DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS COM ADIÇÃO DE
CINZA DE CASCA DE ARROZ

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Luciano Senff.

Joinville

2022

THAIS MAYARA BONELLI

DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS COM ADIÇÃO DE
CINZA DE CASCA DE ARROZ

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 18 de março de 2022.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luciano Senff
Orientador/Presidente
Universidade Federal de Santa Catarina

Me. João António de Sousa Carvalheiras
Universidade de Aveiro, Portugal

Prof. Dra. Derce de Oliveira Souza Recouvreux
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dra. Simone Malutta
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, por colocar pessoas maravilhosas na minha jornada acadêmica e principalmente por me permitir superar todos os desafios encontrados ao longo dos anos de graduação.

Aos meus pais, que estiveram presentes com palavras de incentivo e apoio ao longo de toda minha vida, obrigada, esse sonho não teria se tornado realidade se vocês não estivessem comigo em todos os momentos.

Ao professor Luciano Senff, por todo conhecimento compartilhado, bem como pela paciência com a qual guiou o meu aprendizado.

A Universidade Federal de Santa Catarina de Joinville e seu corpo docente, pelos ensinamentos que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica.

Com carinho, aos meus irmãos, Adriano, Gabriely e Jean, que por muitas vezes foram meu abrigo e mesmo à distância foram capazes de me incentivar.

Ao meu namorado, por todo amor, apoio e compreensão durante esse período. Você fez com que eu observasse a beleza nessa caminhada, mesmo em dias difíceis.

Aos meus amigos, com quem convivi ao longo desses anos de curso, especialmente a Amanda Conradt, Laura Scarpato, Maria Augusta, Monique Fin, Paulo Wolff e Rayana Barboza, por todos os momentos dentro e fora das salas de aula, todas experiências compartilhadas foram fundamentais para concluir essa etapa da minha vida.

As minhas amigas, companheiras de vida, Carolina Sutter, Flávia Ronchi, Nicole Spindola e Thaynara Schramm, por compreenderem, muitas vezes, a minha ausência e por estarem sempre ao meu lado, apesar da distância.

RESUMO

Atualmente, a produção de geopolímeros tem atraído cada vez mais atenção de pesquisadores que desejam obter um material ecologicamente correto, uma vez que a produção do Cimento Portland é responsável pela emissão de grande quantidade de gás carbônico, o que contribui drasticamente para o efeito estufa. Nesse cenário, a busca pelo desenvolvimento sustentável tem intensificado o estudo do reaproveitamento de resíduos a fim de minimizar os impactos ambientais, especialmente na construção civil. No entanto, a durabilidade dos materiais deve ser avaliada para evitar problemas futuros, bem como a busca por alternativas sustentáveis. Nesse âmbito, os geopolímeros destacam-se por serem materiais que geram menos gases poluentes e possuem propriedades semelhantes quando comparado ao Cimento Portland. Considerando isso, este trabalho relata o desenvolvimento de argamassas geopoliméricas com adição de cinza de casca de arroz, variando a concentração de hidróxido de sódio. A cinza de casca de arroz, em paralelo com o metacaulim, foi utilizada como fonte de alumina e sílica, já o silicato de sódio, juntamente com o hidróxido de sódio resultaram na solução ativadora. Para tanto, em primeiro momento, foram desenvolvidos corpos de prova de argamassa geopolimérica de referência, ou seja, sem adição de cinza de casca de arroz (CCA). Em segundo, foram desenvolvidos corpos de provas com adição de 20% e 25% de CCA. Nas formulações que contêm a adição de CCA foram realizadas 3 substituições distintas: primeiro, substituindo o metacaulim por CCA, segundo, substituindo o silicato de sódio por CCA e, por último, substituindo metacaulim em conjunto com o silicato de sódio por CCA. Cabe ressaltar que, para as formulações de referência e 20% de CCA, foram alternadas as concentrações de 6 M, 8 M e 10 M de NaOH. Já para as formulações com 25% de CCA, foram variadas as concentrações em 6 M e 8 M de NaOH. Quanto a incorporação do resíduo no estado fresco, nota-se a redução na trabalhabilidade da argamassa geopolimérica, tornando a mistura altamente viscosa, enquanto a incorporação das partículas finas de metacaulim, quando não substituídas pelo resíduo, melhoram a fluidez da argamassa. Todos os corpos de prova foram curados em temperatura ambiente durante 28 dias. Após esse período, foram analisadas as propriedades físicas no estado endurecido, bem como a resistência mecânica à compressão, que apresentaram percentuais maiores quando comparadas à referência, obtendo resultados médios de compressão de até 88,3 MPa aos 28 dias.

Palavras-chave: Geopolímeros. Construção Civil. Argamassa. Cinza de Casca de Arroz.

ABSTRACT

Currently, geopolymers have attracted more and more attention for environmental friendly, since the material contributes significantly to the production of Portland Cement due to the emission of large amounts of CO₂. Environment, the search for sustainable development has intensified the study of waste recycling, in order to minimize environmental impacts, especially in civil construction. However, the reservation of materials should be avoided to avoid problems when looking for alternatives. In this context, geopolymers stand out for being materials that generate less polluting gases and have similar properties when compared to Portland Cement. Considering, I work on the development of geopolymeric mortar with the addition of rice husk ash, varying the concentration of hydrogen hydroxide of sodium. The rice husk solution, in parallel with the metakaolin, was used as sources of alumina and silicas, as well as the touch-up silicate with the resulting sequence hydroxide. For this purpose, at first, specimens of reference geopolymeric mortar were developed, that is, without addition of CA. Secondly, specimens were prepared with the addition of 20% and 20% of CCA. In the very second formulas that led to the replacement of the first replacement of CCA, 3 replacements were performed by CCA, differentiated by CCA and by the first substituting for metakaolin for CCA and for the first substituting for metakaolin for CCA. It stands out for the reference formulations and 20% CCA was alternated as 6 M, 8 M and 10 M of NaOH. As for the formulas with 25% of CCA, they were added as 6 M, 8 M of NaOH. As for the incorporation of the additive in the fresh state, there is a reduction in the workability of the geopolymer, increasing the incorporation of the mortar into the mortar, while the incorporation of fine metakaolin particles does not change when the fluid is not replaced by the mortar. All bodies during the cured period were 28 as days as properties, mechanical during the curing period, as well as the properties, displayed during the curing period, which showed percent strength were displayed for that environment during the 28th period, as the results were displayed after the temperature during the highest, with proven results when the temperature during the highest were displayed 88.3 MPa at 28 days.

Keywords: Geopolymers. Civil Construction. Mortar. Rice Husk Ash.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do processo de geopolimerização.....	15
Figura 2 – Classificação das estruturas poliméricas tridimensionais dos geopolímeros.....	16
Figura 3 – Materiais desenvolvidos com geopolímero: a) espuma geopolimérica; b) tijolo maciço; c) blocos vazados; d) blocos maciços.	21
Figura 4 – Aplicações de geopolímeros pela empresa Zeobond: a) Caminhão concretando calçamento em Templestowe; b) Calçamento já finalizado em Lyndarum State.....	22
Figura 5 – Aplicações da CCA a partir do beneficiamento do arroz.	23
Figura 6 – Materiais utilizados na produção de argamassas geopoliméricas: a) MK, CCA e areia; b) NaOH de 6 M, 8 M e 10 M; c) Silicato de Sódio.	26
Figura 7 – Distribuição granulométrica do MK.....	28
Figura 8 – Distribuição granulométrica das partículas de CCA.	28
Figura 9 – Difratoograma de sílica da cinza de casca de arroz.....	29
Figura 10 – Areia média grossa utilizada como agregado miúdo no desenvolvimento das argamassas geopoliméricas.	31
Figura 11 – Planejamento experimental.....	33
Figura 12 – Equipamentos utilizados: a) Misturador mecânico; b) Molde dos corpos de prova prismáticos de 4x4x4 cm; c) Balança de precisão (0,01 g).	35
Figura 13 – a) Argamassas geopoliméricas no estado fresco; b) Argamassas para serem desmoldadas após 24h de cura; c) Argamassas desmoldadas.	36
Figura 14 – Equipamentos para o ensaio de mesa de consistência no estado fresco (<i>Flow Table</i>).	37
Figura 15 – Equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão.	38
Figura 16 – Equipamentos para as propriedades físicas no estado endurecido: a) Ensaio de Arquimedes; b) Estufa.	39
Figura 17 – Ensaio na mesa de consistência (<i>flow table</i>).	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Publicações com o tema geopolímero.	20
Gráfico 2 – Índice de consistência das argamassas geopoliméricas.	41
Gráfico 3 – Absorção de água das amostras geopoliméricas.	44
Gráfico 4 – Porosidade aparente das amostras geopoliméricas.	44
Gráfico 5 – Densidade aparente das amostras geopoliméricas.	45
Gráfico 6 – Resistência à compressão das amostras geopoliméricas.	45
Gráfico 7 – Relação entre a resistência a compressão e densidade aparente das amostras geopoliméricas.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ficha técnica do Metacaulim.	26
Tabela 2 - Composição química do Metacaulim.....	27
Tabela 3 - Composição química da CCA.	29
Tabela 4 – Características físico-químicas do hidróxido de sódio.....	30
Tabela 5 – Características físico-químicas do silicato de sódio.	31
Tabela 6 – Características físico-químicas e granulométricas para areia normal #30, lote 47/2019.....	32
Tabela 7 – Formulações percentuais utilizadas no desenvolvimento das argamassas geopoliméricas de referência e com adição de CCA.....	34
Tabela 8 – Quantidade de matérias primas para o ensaio <i>flow-table</i>	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al_2O_3 – Alumina

CaCO_3 – Calcita

CaO – Óxido de cálcio

CERMAT – Núcleo de Pesquisa em Materiais Cerâmicos e Compósitos

CCA – Cinza de Casca de Arroz

CICECO – Centro de Investigação de Materiais Cerâmicos e Compósitos

cm – Centímetros

CP – Cimento Portland

CO_2 – Gás carbônico

CTJ – Centro Tecnológico de Joinville

Fe – Ferro

GP – Geopolímeros

g – Gramas

g/cm^3 – Gramas por centímetro cúbico

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

L – Mica

LabiCons – Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável

K – Caulinita

K_2O – Óxido de Potássio

KOH – Hidróxido de Potássio

MgO – Óxido de Magnésio

MK – Metacaulim

MnO – Óxido de Manganês

MPa – Megapascal

m^2/kg – Metro quadrado por quilograma

M – Molar

μm – Micrômetro

NaCl – Cloreto de Sódio

NaOH – Hidróxido de Sódio

Na_2O – Óxido de sódio

Na_2SiO_3 – Silicato de sódio

NBR – Norma Brasileira

O – Oxigênio

P_2O_5 – Pentóxido de Fósforo

ppm – pontos por milhão

Q – Quartzo

REF – Referência

SiO_2 – Óxido de Silício (Sílica)

S/L – Sólidos/Líquidos

SVA – Sílica Verde do Arroz

TiO_2 – Dióxido de Titânio

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVOS	13
1.1.1. Objetivo Geral	13
1.1.2. Objetivos Específicos	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1. GEOPOLÍMEROS	14
2.1.1. Metacaulim	17
2.1.2. Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio	17
2.1.3. Propriedades dos Geopolímeros	18
2.1.3.1. Estado Fresco	18
2.1.3.2. Estado Endurecido	19
2.1.4. Aplicações na Construção Civil	20
2.2. CINZA DE CASCA DE ARROZ	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1. MATERIAIS	25
3.1.1. Metacaulim	26
3.1.2. Cinza de Casca de Arroz	28
3.1.3. Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio	30
3.1.4. Agregado Miúdo	31
3.2. MÉTODOS	32
3.2.1. Formulações	33
3.2.2. Ensaio no Estado Fresco	36
3.2.3. Ensaio no Estado Endurecido	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1. RESULTADO NO ESTADO FRESCO – ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	40
4.2. RESULTADOS NO ESTADO ENDURECIDO	42
4.2.1. Propriedades físicas: absorção de água, densidade aparente e porosidade aparente	42
4.2.2. Propriedades mecânicas: resistência à compressão	45
5. CONCLUSÃO	49
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50

REFERÊNCIAS.....	51
-------------------------	-----------

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de reduzir os custos e controlar as emissões de gases antropogênicos liberados no meio ambiente levou a um movimento para a substituição de materiais provenientes de carvão e petróleo por fontes alternadas de energia. A construção civil, nesse contexto, tem demonstrado cada vez mais interesse na utilização de resíduos decorrentes de outros processos, buscando por novas alternativas que geram menos poluentes e são classificadas como sustentáveis.

Considerando a produção do Cimento Portland (CP), material amplamente utilizado na construção civil, cuja fabricação promove a liberação de expressiva quantidade de gás carbônico (CO_2) para a atmosfera, percebe-se que a possibilidade de utilização de outros materiais com características semelhantes, como materiais álcali-ativados, minimiza o impacto ambiental. Conhecidos como geopolímeros (GP), esses materiais ricos em aluminossilicatos apresentam vantagens quando comparados ao CP, como elevada resistência mecânica, resistência à ataques ácidos e de sulfatos, entre outras vantagens (AZEVEDO; STRECKER; LOMBARDI, 2018).

Outro fator de relevância no âmbito das pesquisas é a utilização de resíduos como adições em pastas, uma vez que, quando empregados, além de ajudar a reduzir problemas ambientais relacionados à eliminação inadequada, também contribuem em diferentes propriedades ao serem incorporados, dependentes da sua origem, tamanho das partículas e composição química, os quais podem alterar a resistência, coloração, porosidade, trabalhabilidade, entre outros. De acordo com Modolo *et al.* (2017), Moraes *et al.* (2014) e Rajamma *et al.* (2015), cinzas produzidas a partir da combustão de biomassa, como cinza de casca de arroz (CCA), podem se tornar adições ambientais viáveis em materiais de construção, haja visto a prevalência de quartzo que aumenta a natureza siliciosa das cinzas, vantagem que possibilita a substituição de agregados naturais no setor da construção civil.

Mediante ao exposto, com base nas vantagens do uso de geopolímeros e no seu potencial de aplicação, este trabalho concentra-se em analisar as propriedades físicas e mecânicas das pastas feitas com a adição de CCA em teores de 20% e 25%. Com substituição parcial do metacaulim (MK) como fonte de aluminossilicato,

substituição parcial do silicato de sódio (Na_2SiO_3) e, por último com a substituição parcial de metacaulim e silicato de sódio em conjunto.

Para tanto, a cinza de casca de arroz utilizada no presente trabalho de conclusão de curso foi fornecida pela Silcca Nobre. E os ensaios foram realizados no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável (LabICons), do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

1.1. OBJETIVOS

Para relatar o desenvolvimento de argamassas geopoliméricas com adição de cinza de casca de arroz, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Produzir argamassas geopoliméricas com adição de cinza de casca de arroz em teores de 20 e 25%, e avaliar em conjunto a utilização de diferentes concentrações de NaOH.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Formular corpos de provas em argamassas geopoliméricas com diferentes teores de CCA;
- Determinar as propriedades físicas (absorção de água, densidade e porosidade aparente) e mecânica (resistência à compressão axial) das argamassas geopoliméricas produzidas;
- Avaliar a influência da incorporação de CCA em argamassas geopoliméricas nas propriedades do estado endurecido em diferentes concentrações de hidróxido de sódio.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, serão apresentados conceitos relevantes sobre o tema em estudo. A fundamentação teórica está subdividida na temática relacionada ao resíduo de cinza de casca de arroz e na temática sobre a argamassa geopolimérica. Com relação aos assuntos relacionados ao geopolímero, serão abordados, além das suas diversas definições, as matérias-primas necessárias e as suas principais propriedades nos estados fresco e endurecido, analisando a aplicação deste na construção civil. Quanto à fundamentação teórica referente ao resíduo, destacam-se os procedimentos utilizados para obtenção, métodos de geração e suas principais características.

2.1. GEOPOLÍMEROS

Vitor Gluklovsky, na década de 50, apresentou por meio de seus estudos um novo ligante desenvolvido por processos alcalinamente ativados. Foi o primeiro pesquisador a enfatizar que, a partir de modificações geológicas de algumas rochas vulcânicas em zeólitas, ocorre o desenvolvimento de rochas sedimentadas em baixa pressão e temperatura (KOMNITSAS *et al.* 2007).

Posterior aos estudos de Gluklovsky, o pesquisador Joseph Davidovits, durante a década de 70, iniciou suas pesquisas sobre materiais inorgânicos e passou a desenvolver um material sílico-aluminoso tridimensional com microestrutura de amorfa à semicristalina (DAVIDOVITS, 2002). Essa busca por materiais poliméricos resistentes ao fogo deu-se pelos inúmeros incêndios ocasionados na França naquela época, durante os quais, algumas estruturas antigas permaneciam intactas, enquanto outras mais jovens entravam em colapso.

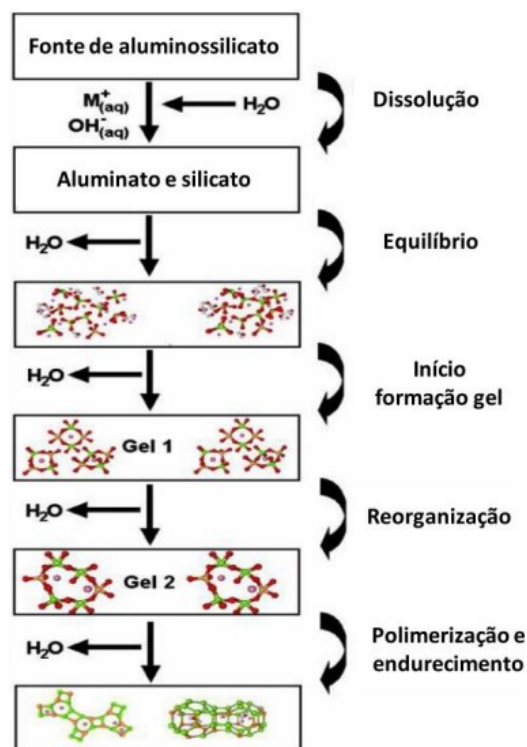
Após seus estudos químicos e mineralógicos, Davidovits (2002) constatou que os blocos das pirâmides do Egito não são formados de pedra calcária natural, mas feitos a partir de calcário caulínico e hidróxido de sódio (NaOH), produzido pela mistura de calcita (CaCO_3) e estruturas amorfas de aluminossilicatos, compostos presentes e característicos dos materiais geopoliméricos.

Em seus estudos, Davidovits (1999), propôs que ligantes poderiam ser produzidos por uma reação polimérica de líquidos alcalinos contendo silício e alumínio, ou por materiais como cinzas volantes e cinza de casca de arroz. Os líquidos

alcalinos são definidos como metais alcalinos solúveis, que geralmente são à base de sódio ou potássio. Atualmente, os mais utilizados são o hidróxido de sódio e o hidróxido de potássio (KOH), frequentemente combinados com o uso de silicato de sódio ou de potássio (WALLAH, 2006).

O geopolímero é formado a partir da geopolimerização, um fenômeno exotérmico que resulta devido à policondensação. De acordo com Duxson *et al.* (2007), este processo de geopolimerização envolve a dissolução inicial dos sólidos, que são responsáveis pela ocorrência da hidrólise superficial do mineral, bem como a dissolução de uma pequena quantidade de solução alcalina de óxidos de Al e Si. Em seguida, no equilíbrio, as espécies dissolvidas reagem com os íons de silicato dissolvidos, ocorrendo a polimerização por condensação, que resulta na formação do gel. A reorganização ocorre seguida da polimerização e do endurecimento do produto da reação. O fluxograma apresentado na Figura 1 demonstra as etapas mencionadas.

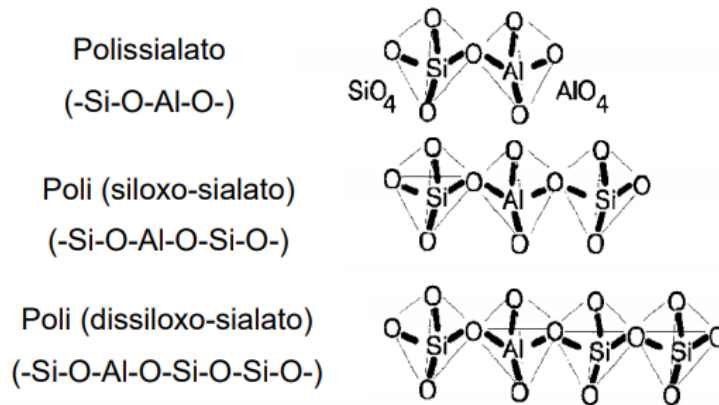
Figura 1 – Fluxograma do processo de geopolimerização.



Fonte: Nagem (2013).

Em resumo, a geopolimerização baseia-se em ativar os minerais de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) em um meio alcalino para que aconteçam as reações que resultam em redes poliméricas tridimensionais, conforme Figura 2 (RAO; LIU, 2015).

Figura 2 – Classificação das estruturas poliméricas tridimensionais dos geopolímeros.



Fonte: Davidovits (1994).

Dessa forma, os geopolímeros são compostos formados basicamente por uma fonte de aluminossilicatos, por exemplo, o metacaulim, e por um ativador alcalino comumente utilizado: o hidróxido de sódio ou potássio. Esses aluminossilicatos devem apresentar uma quantidade considerável de material amorfo, assim como uma dimensão granulométrica adequada. Já o ativador deve apresentar pH elevado o suficiente para conseguir dissolver a parcela amorfa do precursor sólido (LONGHI, 2015).

Devido ao alto custo e elevada energia necessária para a fabricação do silicato alcalino, bem como o impacto ambiental da sua produção, é de extrema vantagem ter à disposição uma fonte de sílica amorfa, para que possam ser utilizadas como fonte sólida de aluminossilicato na fabricação de geopolímeros. Assim, geralmente para a geopolimerização são utilizados vários resíduos industriais e agroindustriais como os aluminossilicatos naturais, o caulim, metacaulim, cinzas volantes ou sílica ativa, podendo assim diminuir os custos de sua produção e o impacto ambiental (SORE *et al.*, 2016).

De acordo com Weerdt (2011), algumas relações entre os elementos químicos devem ser consideradas quando se trata de obter características específicas na fabricação de GP, como grau de resistência à compressão ou retração, sendo uma delas a relação sólidos/líquidos (S/L).

2.1.1. Metacaulim

Segundo Li *et al.* (2010), o metacaulim é um material aluminossilicato termicamente ativado e que apresenta alta atividade pozolânica, sendo formado pela moagem de argilas caulínicas em temperaturas entre 600°C e 850°C. A palavra “meta” significa mudança e, na química, é aplicada para denotar um composto “menos hidratado”, decorrente da desidroxilação realizada (ROCHA, 2005).

De acordo com Davidovits (1994), com a transformação do caulim em metacaulim o material se torna muito mais reativo, com propriedades pozolânicas. Ao utilizar o metacaulim como fonte de aluminossilicatos, o geopolímero resultante é um material menos impuro e de mais fácil caracterização. São considerados "sistema-modelo", sem as complexidades introduzidas pelo uso de cinzas volantes, escórias e outras matérias-primas alternativas, devido às diversas fases amorfas e de difícil caracterização.

O metacaulim possui, em sua composição, elementos essenciais para a produção de geopolímeros, entre eles SiO_2 , cerca de 52%, e Al_2O_3 , com aproximadamente 40%. Os outros 8% são considerados impureza composta de quartzo e outros argilominerais como o feldspato, a mica, gipsita, ferro e materiais orgânicos (NITA, 2006 apud BOCA SANTA, 2012).

O metacaulim pode possuir diferentes graus de finura, superfície específica e colorações variadas (VASSALO, 2013). Todavia, segundo LI *et al.*, (2010), independente do metacaulim variar de tamanho, pureza e cristalinidade, quando este é incluído na matriz geopolimérica, a distribuição das partículas não afeta consideravelmente o comportamento reológico e o grau de reação álcali-ativado.

2.1.2. Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio

Os ativadores alcalinos desempenham um papel fundamental na geopolimerização e apresentam resultados significativos quando se trata de resistência mecânica. Os mais utilizados contêm silicatos de sódio com hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio, visto que soluções que apresentam silicatos de sódio ou potássio possuem maior velocidade de reação do que soluções que apresentam apenas hidróxidos (PALOMO; GRUTZECK; BLANCO 1999).

Segundo Lima Filho (2009), o silicato de sódio, é um composto que tem a fórmula geral Na_2SiO_3 e se encontra disponível tanto em solução aquosa quanto na forma sólida. Vale ressaltar que o fato do silicato de sódio ou potássio apresentar resultados significativos quanto a resistência mecânica ocorre devido à presença de sílica no silicato ser mais reativa do que a contida no metacaulim ou cinza de casca de arroz.

O hidróxido de sódio, cuja fórmula molecular é o NaOH, também é chamado usualmente de soda cáustica. De acordo com Ferreira (2016), por não existir NaOH na natureza, ele é preparado industrialmente pela eletrolise de uma solução aquosa de cloreto de sódio (NaCl).

A utilização de NaOH e Na_2SiO_3 para a produção de GP é mais tradicional devido à não elevação dos custos e por serem mais disponíveis.

2.1.3. Propriedades dos Geopolímeros

Diferentes motivos influenciam nas propriedades da argamassa geopolimérica. Desde o estado fresco quando a natureza do geopolímero encontra-se fluida, até o estado endurecido, quando ela se encontra em processo de endurecimento (cura), de modo a resistir às ações solicitadas ao longo da vida útil. De acordo com Xu *et al.*, (2015) e Zeng e Wang (2016), os geopolímeros são conhecidos pelas suas características de alta resistência à compressão, durabilidade, baixa retração, baixa condutividade térmica, resistência ao fogo, resistência à corrosão, e resistência à umidade.

Contudo, dependendo da forma que ela irá ser empregada têm-se algumas funções que se devem manter, como: unir unidades, contribuir na resistência aos esforços laterais, distribuir cargas, selar juntas, absorver deformações naturais como de origem térmica, ter boa trabalhabilidade, aderência e boa resistência mecânica (YOSHIDA E BARROS, 1995).

2.1.3.1. Estado Fresco

Pasuello (2011) menciona que a falta de conhecimento e controle dos materiais no estado fresco irá impactar no teor de água e, conseqüentemente, nas

propriedades após o estado endurecido (cura) como: retração, porosidade, resistência mecânica, durabilidade, entre outras.

No estado fresco da pasta geopolimérica, em sua grande parte, as propriedades estão relacionadas entre si. No entanto, a trabalhabilidade ganha destaque por ser uma das propriedades mais relevantes, relacionada diretamente ao teor de água na mistura. Ela determina se a pasta possui consistência e plasticidade adequadas ao processo de execução em que ela será empregada. Pode ser, também, modificada pelas características da microestrutura do metacaulim: quanto mais arredondadas e homogêneas suas partículas, mais fácil a dispersão do geopolímero (SIMÕES *et al.*, 2012).

2.1.3.2. Estado Endurecido

O processo de endurecimento do geopolímero, ou seja, estado endurecido, ocorre após o estado fresco. Conforme o tempo de cura vai aumentando, a resistência, suas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais tendem a se estabilizar. Nesse contexto, as propriedades, nessa fase endurecida, podem ser divididas em mecânicas e físicas.

A análise da capacidade do material de resistir a esforços mecânicos é uma das principais propriedades a serem analisadas. Elas podem ser de tração, de cisalhamento e de compressão. Esta última, no entanto, é a que mais tem enfoque na hora da escolha da pasta, pois ela nos dá uma indicação geral da qualidade do geopolímero, já que é um parâmetro fundamental nos cálculos estruturais. (MACCARINI, 2015).

Quando se trata do desempenho mecânico dos materiais geopoliméricos, alguns elementos podem influenciar, entre eles: a distribuição do tamanho das partículas, a proporção de dissolução da fase gel, a natureza amorfa da matéria-prima sólida, o grau de cristalinidade, a relação de dissolução entre sílica/alumina, a concentração do ativador, entre outros (XU *et al.*, 2001 apud KOMNITSAS *et al.*, 2007).

Já as propriedades físicas atuam como uma forma de relacionar o comportamento do material com as propriedades mecânicas e proporcionar, por meio da Lei de Arquimedes, a relação dos três tipos de massa: seca, saturada e imersa, obtendo-se as propriedades de absorção, densidade e porosidade.

Dentre as propriedades físicas, a densidade aparente mede, indiretamente, o volume de vazios e a quantidade de água evaporada durante o processo de endurecimento. De acordo com Simões *et al.*, 2012, a variação sujeita nessas medições está associada com a relação S/L e com o volume da pasta que diz respeito à sua porosidade.

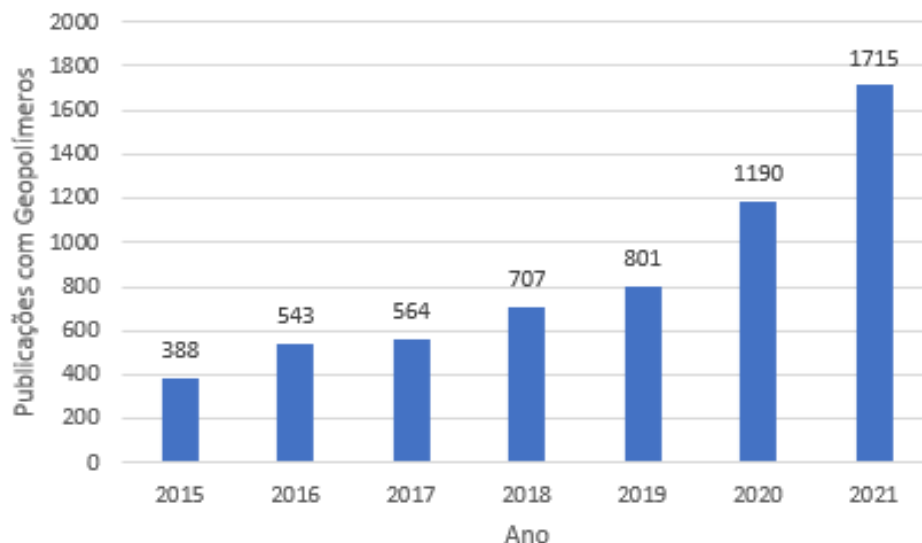
2.1.4. Aplicações na Construção Civil

Diversos fatores caracterizam os geopolímeros como produtos com grande potencial de aplicação, entre eles têm-se o baixo consumo de energia e a diminuição de emissão de gases poluentes, considerados, por exemplo, como alternativas mais sustentáveis quando comparado aos cimentos.

Os geopolímeros já possuem aplicação prática em diversas partes do mundo, sendo empregados como dormentes de ferrovias, blocos refratários, painéis pré-fabricados, reparações de rodovias e em obras de infraestrutura de pavimentação (GLASBY *et al.*, 2015). Pode-se citar ainda outras finalidades para o uso dos geopolímeros como cimento para ambientes agressivos, reparos estruturais e contenção de resíduos tóxicos (CASCAES, 2016, p. 13).

Nesse contexto, pesquisas e publicações com o tema geopolímero vêm aumentando gradativamente no decorrer dos últimos anos. O Gráfico 1 apresenta os dados obtidos no *website* Science Direct, biblioteca online de artigos científicos.

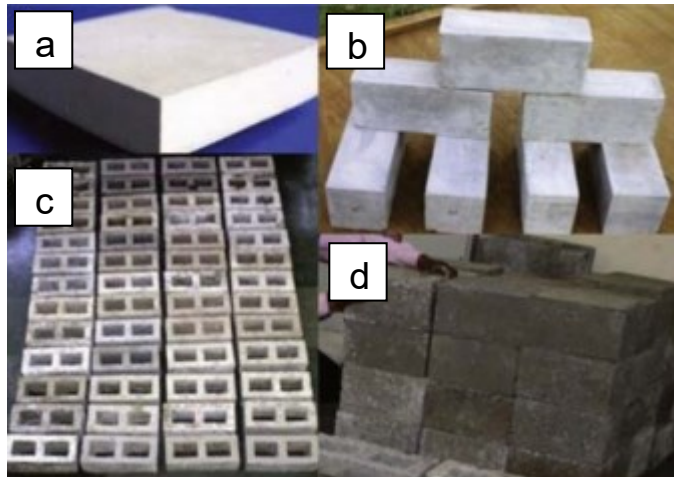
Gráfico 1 – Publicações com o tema geopolímero.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Singh *et al.* (2015) apresentam que os estudos das propriedades das misturas geopoliméricas tornaram possíveis a produção de argamassas, espumas geopoliméricas, tijolos e blocos sólidos, conforme Figura 3.

Figura 3 – Materiais desenvolvidos com geopolímero: a) espuma geopolimérica; b) tijolo maciço; c) blocos vazados; d) blocos maciços.



Fonte: SINGH *et al.* (2015).

Segundo Trindade (2017), Zeobond na Austrália foi uma das primeiras empresas a comercializar produtos geopoliméricos. Na Figura 4, são mostradas algumas das aplicações do material comercializado pelo pesquisador J. Van Deventer, responsável pela criação. Vale ressaltar que, é possível transportar este material em larga escala, assim como ocorre com o concreto convencional.

Figura 4 – Aplicações de geopolímeros pela empresa Zeobond: a) Caminhão concretando calçamento em Templestowe; b) Calçamento já finalizado em Lyndarum State



Fonte: The Zeobond Group (2018).

De acordo com Simões (2012), esse material tem uma ampla gama de aplicações promissoras e apresenta vantagens ambientais e tecnológicas, em especial com relação à durabilidade. Todavia, ainda é necessário expandir o conhecimento desses materiais para torná-los economicamente viáveis em utilizações generalizadas.

2.2. CINZA DE CASCA DE ARROZ

A cinza de casca de arroz (CCA) é o resíduo proveniente da cadeia produtiva do arroz e equivale a cerca de 20% da casca queimada. No Brasil, de acordo com os dados da Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, a região Sul apresenta o maior percentual de produção de arroz.

Segundo Tashima (2006), outra característica da CCA que merece destaque é a sua coloração, que pode variar de branco rosado, que representa a oxidação completa da cinza, até uma tonalidade mais escura, de cor preta, em virtude do teor de carbono contido nesse material. Lima (2010), ressalta que, quando depositada no solo de forma incorreta, a CCA, por ter degradação lenta, pode levar à ocorrência de gases como metano e óxido nitroso, prejudiciais à atmosfera.

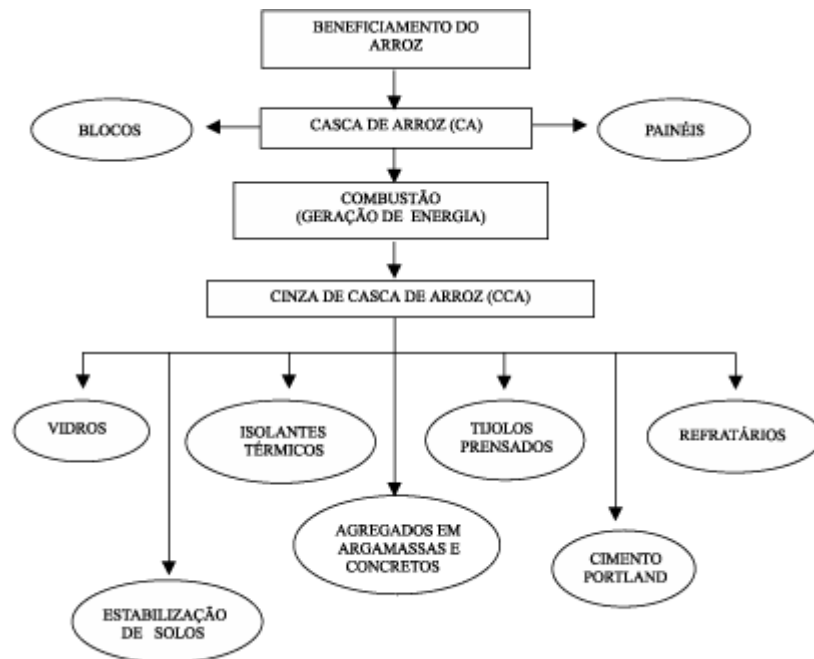
Contudo, a norma brasileira NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos de acordo com a sua periculosidade e solubilidade. Nesse contexto, a cinza da casca de arroz é classificada como resíduo de Classe II A, não perigoso e não

inerte, mostrando biodegradabilidade em água e combustibilidade (FLORIANO, 2014).

A CCA é uma importante fonte renovável de sílica, pois contém de 74 a 97% desse componente, com percentuais menores de outros elementos, podendo essa sílica ser cristalina ou amorfa (TASHIMA, 2007). De acordo com Chandrasekhar *et al.* (2003), quando a queima se dá em temperaturas mais elevadas (sem um controle), observa-se uma CCA rica em sílica cristalina. No entanto, quando submetida à queima controlada, com temperatura inferior à 600°C, a sílica obtida é amorfa com alta reatividade (TASHIMA; SILVA; AKASAKI, 2004).

Utilizada também como fonte de energia elétrica, em usinas termelétricas, uma alternativa vantajosa, do ponto de vista econômico, tecnológico e ecológico (SANTOS, 2006). Além das aplicações já mencionadas, Quesada (2017) menciona outras utilizações da CCA, como gel de sílica, isolante, catalisadores, zeólitas, grafeno, componente em baterias de íons de lítio, capacitores e captura de carbono. De forma resumida, a Figura 5 apresenta algumas aplicações da CCA a partir do beneficiamento do arroz.

Figura 5 – Aplicações da CCA a partir do beneficiamento do arroz.



Fonte: Della *et al.* (2001).

Se a CCA for utilizada, direta ou indiretamente, com finalidade comercial, fechar-se-á o ciclo da industrialização do arroz, sendo possível o total aproveitamento da matéria-prima proveniente da lavoura, já que o farelo, o gérmen e outros componentes possuem seu destino no mercado (Foletto *et al.*, 2005).

Segundo Mehta (1992 apud TIBONI, 2007), a substituição de cerca de 10 a 20% de CCA já é o suficiente para garantir a diminuição da permeabilidade frente a agentes agressivos e o aumento de resistência mecânica.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo, serão apresentados os materiais, métodos e equipamentos utilizados para o desenvolvimento das argamassas geopoliméricas. Em resumo, foram desenvolvidas 16 formulações distintas, variando os teores da CCA em 20% para 6 molar (M), 8 M e 10 M de hidróxido de sódio e em 25% para 6 M e 8 M de hidróxido de sódio.

O preparo dos corpos de prova das argamassas geopoliméricas, a realização dos ensaios no estado fresco e os ensaios das propriedades físicas foram executados no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável, localizado no Centro Tecnológico de Joinville na Universidade Federal de Santa Catarina.

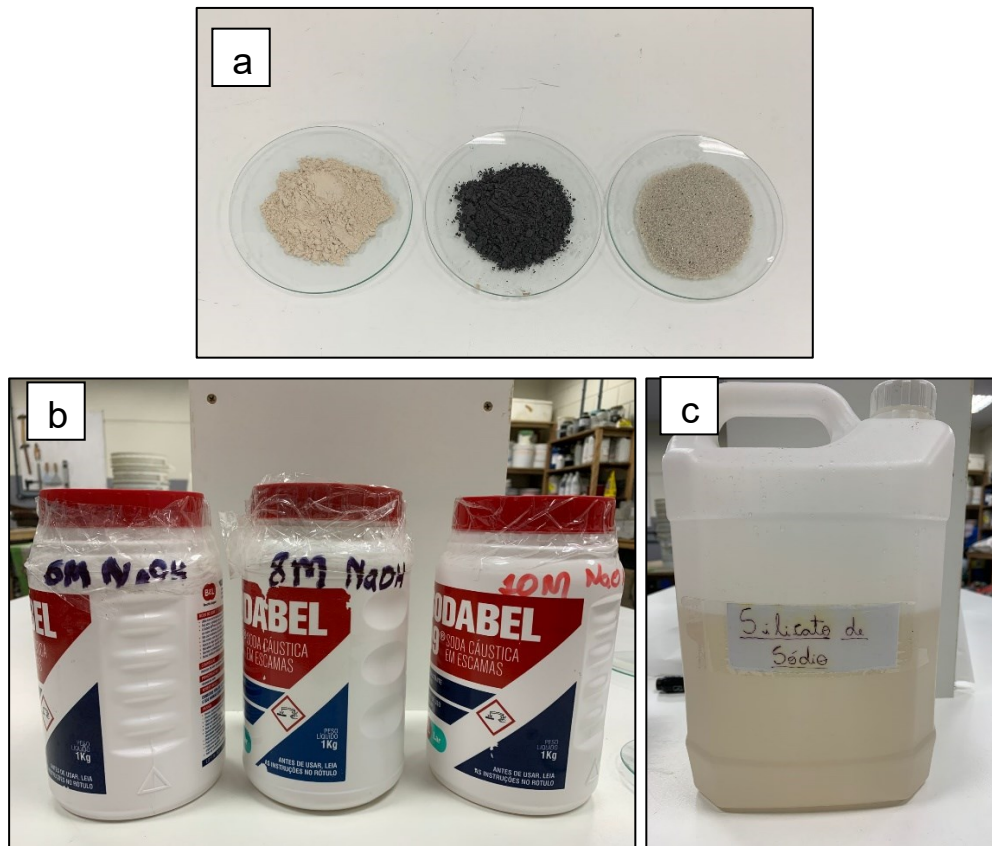
Os ensaios no estado endurecido para compressão contaram com o apoio da Perville Engenharia e Empreendimentos. Os demais ensaios laboratoriais de caracterização foram realizados no Centro de Investigação de Materiais Cerâmicos e Compósitos (CICECO) em Portugal, e, no Núcleo de Pesquisa em Materiais Cerâmicos e Compósitos (CERMAT) do Departamento de Engenharia Mecânica UFSC – Florianópolis.

Cabe ressaltar que todas as formulações foram desenvolvidas utilizando o mesmo procedimento.

3.1. MATERIAIS

Conforme já mencionado, para a produção dos geopolímeros é necessária uma fonte de sílica e alumina, aluminossilicatos e uma solução de ativador alcalino. Dessa forma, os materiais que foram utilizados (Figura 6) para o desenvolvimento das argamassas geopoliméricas consistem em: MK e CCA, como fonte de aluminossilicatos; silicato de sódio e hidróxido de sódio, como ativadores alcalinos; Areia média grossa como agregado miúdo.

Figura 6 – Materiais utilizados na produção de argamassas geopoliméricas: a) MK, CCA e areia; b) NaOH de 6 M, 8 M e 10 M; c) Silicato de Sódio.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

3.1.1. Metacaulim

O metacaulim utilizado como fonte de aluminossilicatos foi fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda, onde é chamado de Metacaulim HP Ultra. De acordo com a ficha técnica disponível no *website* da empresa, a Tabela 1 apresenta os valores limites estabelecidos pela NBR 15.894 (ABNT, 2010), bem como os valores típicos do metacaulim.

Tabela 1 – Ficha técnica do Metacaulim.

Propriedades Físico-Químicas	Valores Típicos	Valores Limites (NBR 15.894)
Perda ao Fogo	3%	< 4%
Índice de atividade pozolânica com cimento (7 dias)	115%	> 105%
Área Específica BET	230.000 cm ² /g	150.000 cm ² /g
Massa Específica	2,56 kg/dm ³	-

Fonte: Metacaulim do Brasil (2022).

O Centro de Investigação de Materiais Cerâmicos e Compósitos, em Portugal, realizou alguns ensaios de caracterização do material, nos quais, por meio do ensaio de fluorescência de raios-X, foi determinada a composição química do metacaulim, conforme a Tabela 2, onde é possível observar os significativos percentuais de Al_2O_3 e SiO_2 .

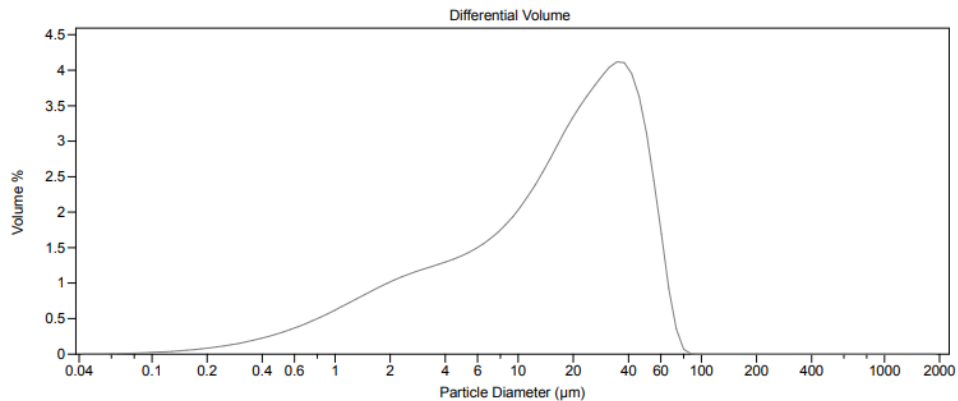
Tabela 2 - Composição química do Metacaulim.

Óxidos	Teor (%)	Elementos Traços	Valores em ppm
Al_2O_3	28,356	Sc	9,1
CaO	0,098	Co	15
Fe₂O₃	2,121	Ni	17,7
K_2O	0,326	Cu	47
Na_2O	0,049	Ga	11,3
P_2O_5	0,048	Se	4,5
MnO	0,011	Rb	19,2
SiO_2	65,86	Sr	10,1
TiO_2	1,864	Y	5,1
SO_3	0,022	Nb	13,3
Zr	0,051	Mo	1,5
Ba	0,009	Ag	12,6
LOI	1,12	Sn	11,3
Pb	0,008	Te	12,9
Cr	0,015	Cs	6,2

Fonte: CICECO (2022).

O mesmo centro de pesquisa realizou o ensaio de distribuição granulométrica (Figura 7), onde foi possível verificar que o tamanho médio das partículas de MK correspondem a 17,05 μm .

Figura 7 – Distribuição granulométrica do MK.



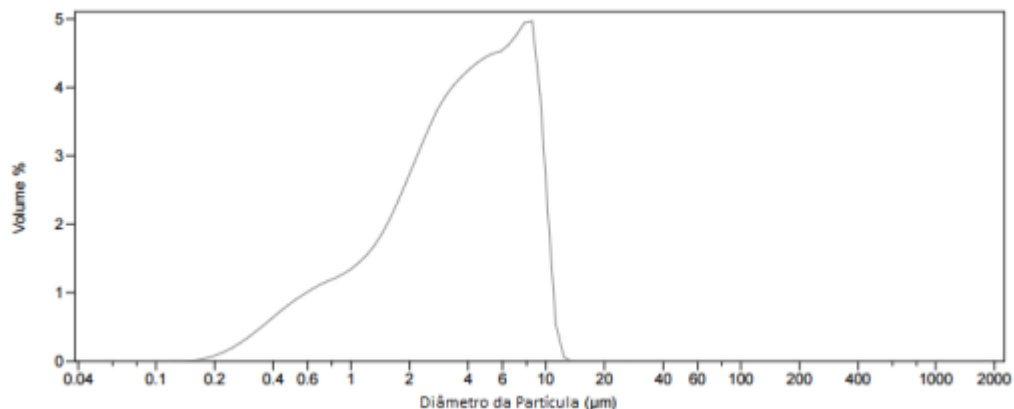
Fonte: CICECO (2022).

A área específica do material provém de estudos realizados no Núcleo de Pesquisa CERMAT (2015), resultando em 32700 m²/kg.

3.1.2. Cinza de Casca de Arroz

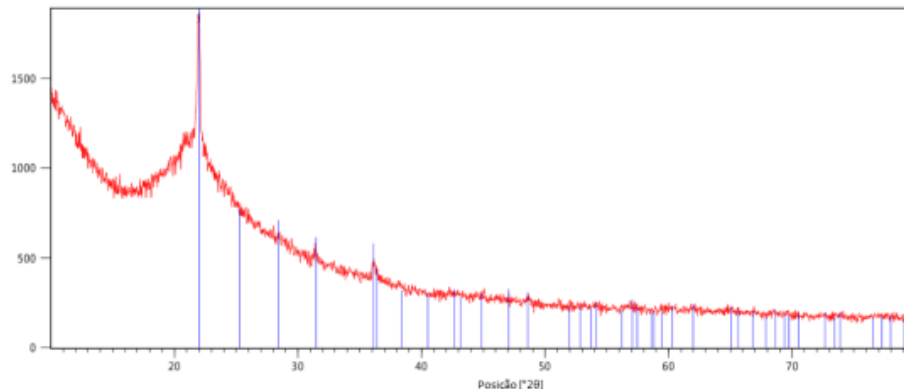
A cinza de casca de arroz utilizada no presente trabalho é oriunda da usina termoelétrica Sílica Verde do Arroz (SVA), do grupo Pilecco Nobre. Sua caracterização foi realizada no CICECO, possibilitando definir o tamanho médio das partículas em 4,208 µm por meio da análise granulométrica das partículas (Figura 8) e difração de raios-x (Figura 9), técnica que permite a identificação das fases cristalinas e o grau de amorfismo das amostras. Marangon *et al.* (2013) ressalta ainda que a CCA apresenta uma área específica de 21142 m²/kg.

Figura 8 – Distribuição granulométrica das partículas de CCA.



Fonte: CICECO (2017).

Figura 9 – Difratoograma de sílica da cinza de casca de arroz.



Fonte: CICECO (2017).

De acordo com Marangon *et al.* (2013), é possível concluir que a CCA possui uma estrutura altamente amorfa, porém seus picos (como os apresentados nos gráficos) indicam a presença de uma fase cristalina. Através da difração de raios-x (Figura 9) foram identificadas as seguintes fases: caulinita (K), quartzo (Q) e mica (L), sendo formadas por Si e Al, mas apresentam estruturas diferentes (MACCARINI, 2015). Sendo assim, nem todo material é reativo.

Cabe ressaltar que, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2012), que orienta a produção de materiais pozolânicos, considera o limite de 6% para a perda ao fogo, requisito que é atendido, conforme a Tabela 3 com a composição química da CCA.

Tabela 3 - Composição química da CCA.

Descrição	Resultados (%)
SiO₂	90,65
CaO	0,59
MgO	0,42
Fe₂O₃	0,06
Al₂O₃	0,18
Na₂O	0,05
K₂O	2,51
MnO	0,32
SO₃	0,34
P₂O₅	0,56
Cl	0,30
Perda ao fogo	4,01
Ba	0,01

Fonte: CICECO (2017).

Mediante ao exposto, observa-se que a CCA, como já mencionado anteriormente, é uma importante fonte de sílica a ser incorporada à argamassa geopolimérica, trazendo benefícios significativos com relação a razão Si/Al do material.

3.1.3. Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio

O hidróxido de sódio, utilizado como ativador alcalino, pertence à empresa Buschle & Lepper S.A. Com seu aspecto visual em escamas, o NaOH se apresenta sem odor e com massa molar igual a 39,997g/mol. As soluções de hidróxido de sódio foram preparadas com água destilada, dessa forma, considerando sua concentração de 97% e 1 litro de água, foi necessário dissolver 412,32g, 329,85g e 247,39g de NaOH para se obter uma solução de 10 M, 8 M e 6 M, respectivamente.

Da mesma forma, o silicato de sódio neutro Q-79 utilizado foi obtido pela mesma empresa. Seu aspecto visual apresenta consistência líquida e bastante viscosa. A utilização do silicato de sódio como ativador alcalino ocorre em conjunto com o hidróxido de sódio, para que a polimerização aconteça.

As especificações técnicas no que diz respeito às características físico-químicas do NaOH e Na_2SiO_3 são apresentadas nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Características físico-químicas do hidróxido de sódio.

Descrição	Mínimo	Máximo
Concentração (%)	97,00	100,00
Carbonatos (Na_2CO_3)	-	0,60 %
Cloretos (NaCl)	-	0,30 %
Ferro (Fe)	-	6,00 ppm
Densidade (g/cm^3)	2,13	2,20

Fonte: Buschle & Lepper S.A. (2022).

Tabela 5 – Características físico-químicas do silicato de sódio.

Descrição	Mínimo	Máximo
Densidade (g/cm ³)	1,39	1,42
Viscosidade (cP)	250,00	500,00
Óxido de sódio (%)	8,50	9,20
Óxido de silício (%)	27,80	30,50
Sólidos totais (%)	37,00	39,00
Relação (SiO ₂)/(Na ₂ O)	3,02	3,59
Água (%)	61,00	63,00

Fonte: Buschle & Lepper S.A. (2022).

3.1.4. Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado na composição provém do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do estado de São Paulo. Caracterizado como areia média grossa de fração 30, conforme Figura 10. Suas especificações (Tabela 6) foram obtidas no *website* do IPT através do lote do material utilizado: 47/2019.

Figura 10 – Areia média grossa utilizada como agregado miúdo no desenvolvimento das argamassas geopoliméricas.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Tabela 6 – Características físico-químicas e granulométricas para areia normal #30, lote 47/2019.

Determinação	Resultados	Requisito
Teor de sílica - ABNT NBR 14656:2001	97,9 %	≥ 95%, em massa
Granulometria ABNT NBR NM 248:2003	98 %	≥ 95 %
Umidade - ABNT NBR 7214:2015	0,0	≤ 0,2%, em massa
Matéria orgânica - ABNT NBR NM 49:2001	< 100 ppm	≤ 100 ppm

Fonte: Becere e Chotoli (2019).

De acordo com o IPT, a areia normal brasileira é utilizada por todos os laboratórios nacionais que realizam ensaios físicos-mecânicos, e, seu uso, definido como material de referência, segue a exigência da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 7215:1996- Determinação da resistência a compressão.

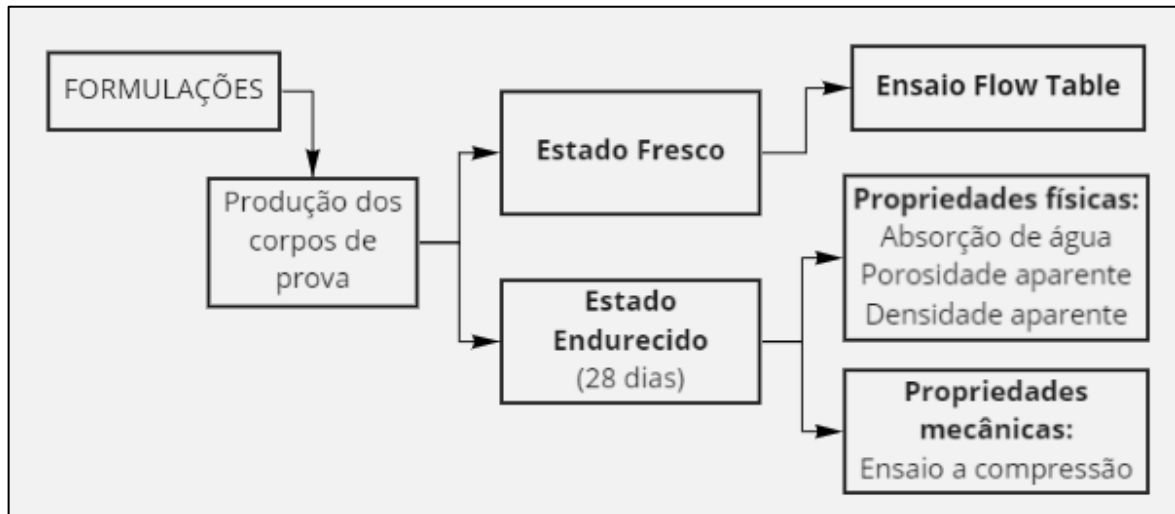
Nesse contexto, segundo diretrizes da NBR 7214 (ABNT, 2015), a areia utilizada possui material retido na peneira de 0,6mm, sendo denominada como areia média grossa.

3.2. MÉTODOS

Por meio de um planejamento experimental (Figura 11), as formulações das argamassas geopoliméricas, previamente definidas por Buruberri (2021), foram desenvolvidas em corpos de prova com dimensões de 4x4x4cm, de acordo com a norma NBR 13279 (ABNT, 2005b).

De forma a avaliar a influência da CCA em diferentes formulações, a metodologia deste trabalho compreende duas etapas principais a serem executadas. Inicialmente, com as formulações já pré-definidas descritas no item 3.2.1, foi possível produzir 8 corpos de prova para cada formulação. Após a produção e seu tempo de cura (28 dias), 2 corpos de prova foram usados para as propriedades físicas e 6 corpos de prova para a propriedade mecânica. Esses ensaios de caracterização permitem entender o comportamento das adições da CCA nessas misturas.

Figura 11 – Planejamento experimental.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

3.2.1. Formulações

Com base na metodologia e formulações definidas por Buruberri (2021), foram adotadas a relação Pasta/Areia em 1:0,3 (massa) e as porcentagens em massa de MK, NaOH e Na₂SiO₃ iguais a 52%, 13% e 35%, respectivamente. Partindo desse ponto, as formulações foram realizadas (Tabela 7), primeiramente com uma formulação de referência (REF), na qual não há inclusão de CCA, seguido pelas formulações com adição de 20% de CCA e posteriormente 25% de CCA. A fim de complementar o estudo, as formulações foram definidas variando as razões molares de NaOH em 6 M, 8 M e 10 M.

O motivo pelo qual optou-se em variar as concentrações molares no desenvolvimento das argamassas geopoliméricas deve-se ao fato de contribuir significativamente na trabalhabilidade, e permitir a realização de um mapeamento nas suas propriedades no estado fresco e endurecido. Haja visto que, ao utilizar uma concentração de 6 M de NaOH tem-se melhor trabalhabilidade na mistura, além de ser mais sustentável quando comparada a 10 M, por exemplo.

Dessa forma, com as porcentagens e materiais definidos, 16 formulações (128 corpos de prova) foram desenvolvidas, em primeiro momento foram desenvolvidas as formulações de referência, logo depois substituindo somente o MK, em seguida, substituindo somente o silicato de sódio. Por último, os dois materiais foram substituídos simultaneamente.

Tabela 7 – Formulações percentuais utilizadas no desenvolvimento das argamassas geopoliméricas de referência e com adição de CCA.

	%							
	CCA	MK	NaOH (6 M)	NaOH (8 M)	NaOH (10 M)	Na ₂ SiO ₃	Areia	S/L
REF 6M	0,0	52	13	-	-	35	100	1,08
REF 8M	0,0	52	-	13	-	35	100	1,08
REF 10M	0,0	52	-	-	13	35	100	1,08
MK 6M	20	41,6	13	-	-	35	100	1,08
MK 8M	20	41,6	-	13	-	35	100	1,08
MK 10M	20	41,6	-	-	13	35	100	1,08
SS 6M	20	52	13	-	-	28	100	1,44
SS 8M	20	52	-	13	-	28	100	1,44
SS 10M	20	52	-	-	13	28	100	1,44
AM 6M	20	41,6	13	-	-	28	100	1,44
AM 8M	20	41,6	-	13	-	28	100	1,44
AM 10M	20	41,6	-	-	13	28	100	1,44
SS 6M	25	52	13	-	-	26,25	100	1,55
SS 8M	25	52	-	13	-	26,25	100	1,55
AM 6M	25	39	13	-	-	26,25	100	1,55
AM 8M	25	39	-	13	-	26,25	100	1,55

Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Em que:

- REF: Formulações de referência com NaOH de 6 M, 8M e 10 M;
- MK: Formulações com substituição parcial de MK com NaOH de 6 M, 8 M e 10 M;
- SS: Formulações com substituição parcial de Na₂SiO₃ com NaOH de 6 M, 8 M e 10 M;
- AM: Formulações com substituição parcial de ambos (MK+Na₂SiO₃) com NaOH de 6 M, 8 M e 10 M.

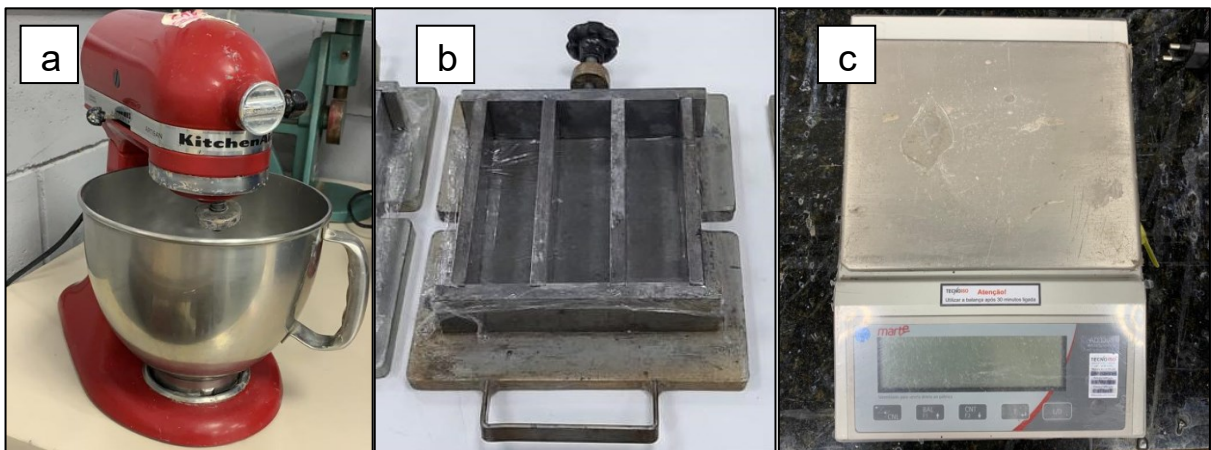
O procedimento utilizado para a preparação das argamassas geopoliméricas inicia-se primeiramente com a solução ativadora, misturando o NaOH e o silicato de sódio no misturador mecânico por 5 minutos, em velocidade baixa, para homogeneizar a fração líquida. Em seguida, adicionou-se o MK e a CCA (quando adicionada) na composição para que fosse misturada por 10 minutos, em velocidade 2 do misturador mecânico. Durante 1 minuto a mistura foi feita manualmente para que o material

aderido nas laterais do misturador fosse retirado. Posteriormente, a areia foi adicionada e misturada por mais 2 minutos.

Após a produção das argamassas geopoliméricas, os corpos de prova foram moldados conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005), nivelados com uma espátula, divididos com um suporte para que obtivessem o tamanho adequado e, por fim, deixados à temperatura de 25° C por 24h. Logo após esse período, os corpos de prova foram desmoldados e armazenados em temperatura ambiente por 28 dias, para o processo de cura.

Os equipamentos utilizados para a produção das argamassas estão apresentados na Figura 12.

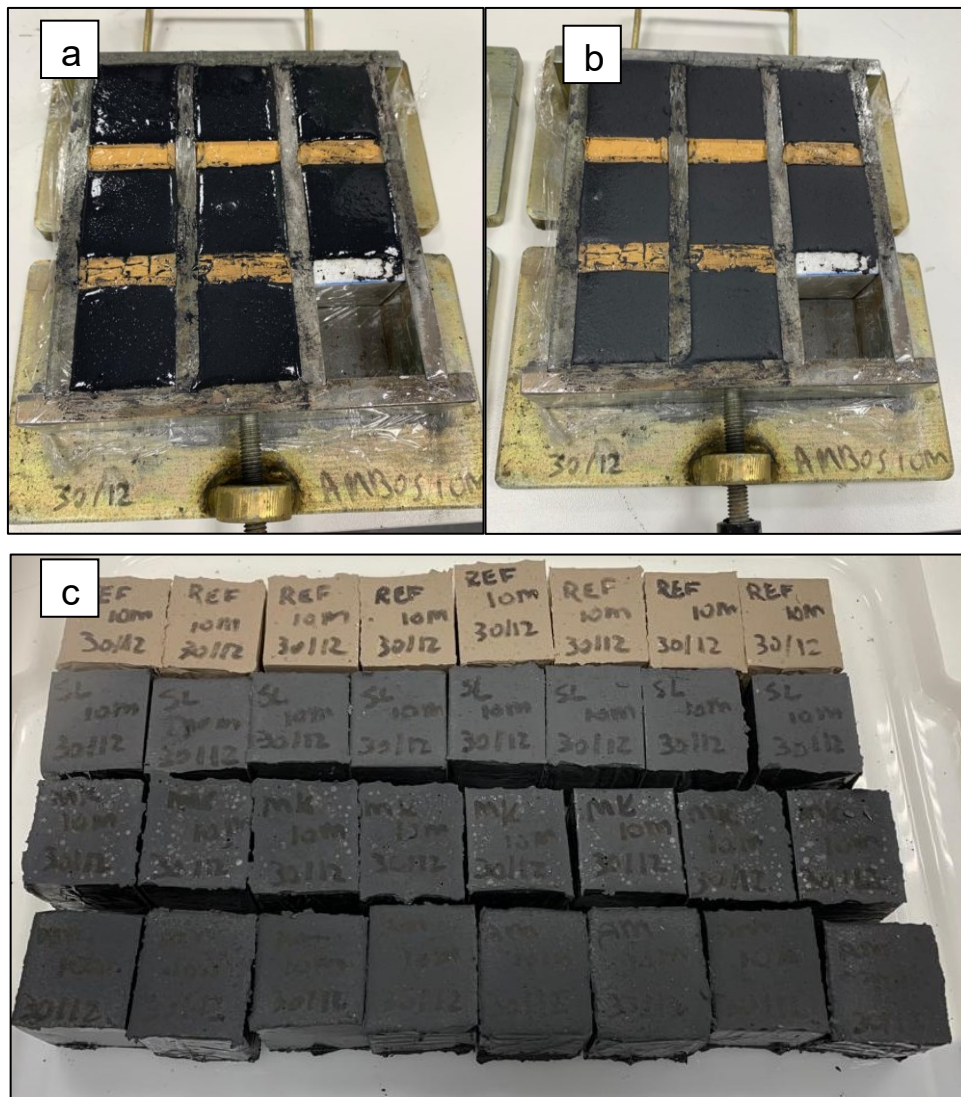
Figura 12 – Equipamentos utilizados: a) Misturador mecânico; b) Molde dos corpos de prova prismáticos de 4x4x4 cm; c) Balança de precisão (0,01 g).



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Para fins demonstrativos, as argamassas geopoliméricas moldadas no estado fresco e após as 24h de cura para serem desmoldadas estão apresentadas na Figura 13, bem como os corpos de prova já desmoldados.

Figura 13 – a) Argamassas geopoliméricas no estado fresco; b) Argamassas para serem desmoldadas após 24h de cura; c) Argamassas desmoldadas.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

3.2.2. Ensaio no Estado Fresco

Especificado pelas normas NBR 7215 (ABNT, 1996) e NBR 13276 (ABNT, 2016), o ensaio de mesa (*flow table*), tem por objetivo analisar e avaliar as argamassas quanto a sua consistência e plasticidade. Para o presente trabalho, este ensaio teve como objetivo limitar a quantidade de resíduo inserido nas argamassas, até alcançar valores aceitáveis de trabalhabilidade e um intervalo ideal de aberturas.

Conforme especificado na norma, o ensaio deve ser realizado imediatamente após a preparação da mistura, para tanto, o preenchimento do molde em formato de

tronco de cone seguiu uma indicação. O preenchimento deu-se em três camadas de mesma altura, no primeiro terço de massa depositado no molde foram proferidos 15 golpes com um soquete metálico para adensar a mistura, em seguida no segundo terço de massa depositado foram proferidos 10 golpes com o mesmo soquete metálico e na última parcela foram proferidos 5 golpes com o mesmo equipamento. Após o preenchimento completo, o molde é retirado para que a mistura possa se espalhar na mesa de forma uniforme, e imediatamente são deferidos 30 golpes no intervalo de 30 segundos, ou seja 1 segundo para cada golpe proferido. A Figura 14 apresenta os equipamentos do ensaio, como a mesa de consistência, o molde em formato de tronco de cone e o soquete metálico.

Figura 14 – Equipamentos para o ensaio de mesa de consistência no estado fresco (*Flow Table*).



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

3.2.3. Ensaio no Estado Endurecido

Nesta seção, serão descritos os procedimentos dos ensaios realizados nos corpos de prova no estado endurecido, ou seja, após seus 28 dias de cura ambiente. Os ensaios de resistência à compressão dos 96 corpos de prova foram realizados na Perville Engenharia e Empreendimentos – Joinville (Figura 15) e seguiram a normativa NBR 13279 (ABNT, 2005).

Figura 15 – Equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Após a realização destes ensaios, as propriedades físicas das amostras também foram estudadas. Para tanto, assim como no ensaio de resistência à compressão, os ensaios de caracterização física (absorção, densidade aparente e porosidade aberta) especificados pelas normas NBR 13280 (ABNT, 2005) e NBR 9778 (ABNT, 2005) também foram realizados com 28 dias de cura, a fim de correlacionar os tais resultados com os obtidos nos testes de compressão.

O método utilizado segue o princípio de Arquimedes (Figura 16), adotado por Pennings e Grellner (1989) na caracterização de materiais porosos. O método consiste em determinar a massa seca (m_s) através de secagem das amostras em temperatura de aproximadamente 100°C por 24 horas (estufa da Figura 16) e, posteriormente, com auxílio de uma balança de precisão de 0,01 g, ser realizada a pesagem. Após esse período, é determinada a massa imersa (m_i) por meio da imersão dos corpos de prova em água por 72 horas, seguida da pesagem imersa (m_i), a partir de uma balança hidrostática. Por fim, ocorre a determinação da massa saturada com superfície seca (m_{ss}) através da pesagem da amostra após leve secagem de sua superfície utilizando papel toalha.

A partir dos resultados obtidos, referentes aos pesos, é possível determinar a absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente das amostras através das equações abaixo.

$$\text{Absorção de água} = \frac{m_{ss} - m_s}{m_s} * 100 \quad \text{Eq. 1}$$

$$\text{Densidade Aparente} = \frac{m_s}{m_{ss} - m_i} \quad \text{Eq. 2}$$

$$\text{Porosidade Aberta} = \frac{m_{ss} - m_s}{m_{ss} - m_i} * 100 \quad \text{Eq. 3}$$

Em que: m_s = massa seca, m_i = massa imersa e m_{ss} = massa saturada com superfície seca.

Figura 16 – Equipamentos para as propriedades físicas no estado endurecido: a) Ensaio de Arquimedes; b) Estufa.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios realizados no estado fresco das argamassas e, na sequência, serão apresentados os resultados no estado endurecido.

4.1. RESULTADO NO ESTADO FRESCO – ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

Com as formulações das argamassas geopoliméricas previamente definidas por Buruberri (2021) não houve a necessidade de realizar o ensaio para definir a relação S/L. Contudo, para se avaliar a influência da viscosidade dos precursores e da solução ativadora alcalina na trabalhabilidade das argamassas, utilizou-se o ensaio em mesa de consistência (*flow-table*), preconizado pela NBR 13276 (ABNT, 2016).

A formulação de referência, que contém 0% de CCA em sua composição, resultou em uma abertura de 355 ± 5 mm. Já a argamassa com 20% de CCA e substituição parcial de MK apresentou uma abertura de 350 ± 5 mm. Essa semelhança nas aberturas justifica-se pela quantidade de S/L presentes na mistura. A Tabela 8 apresenta a quantidade em massa das matérias-primas utilizadas para a realização do ensaio de mesa nas formulações descritas.

Tabela 8 – Quantidade de matérias primas para o ensaio *flow-table*.

	Matérias-primas em massa (g)						
	CCA	MK	NaOH (6 M)	NaOH (8 M)	NaOH (10 M)	Na ₂ SiO ₃	AREIA
REF 6M	0,0	546,00	136,50	-	-	367,50	315,00
REF 8M	0,0	546,00	-	136,50	-	367,50	315,00
REF 10M	0,0	546,00	-	-	136,50	367,50	315,00
MK 6M	109,20	436,80	136,50	-	-	367,50	315,00
MK 8M	109,20	436,80	-	136,50	-	367,50	315,00
MK 10M	109,20	436,80	-	-	136,50	367,50	315,00

Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Dessa forma, considerando essas as piores situações, onde as argamassas geopoliméricas ficaram consideravelmente mais fluidas ao moldar os corpos de prova,

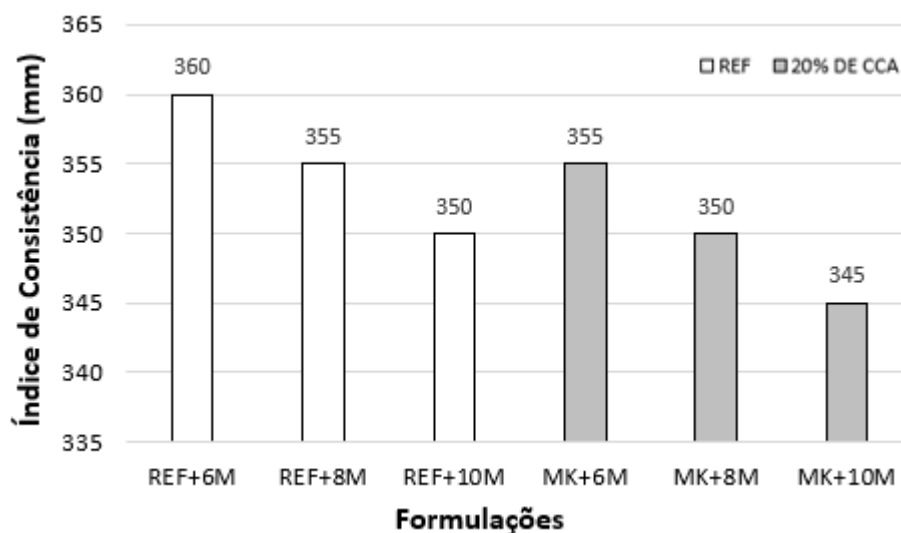
optou-se por não realizar o ensaio de mesa nas demais formulações, nas quais verificou-se queda na trabalhabilidade das argamassas (menor fluidez) com o aumento da viscosidade das soluções ativadoras alcalinas tanto para adições com 20% de CCA quanto para 25%.

Por exemplo, na substituição parcial do silicato de sódio, a quantidade de metacaulim e areia permanecem constantes, já a cinza de casca de arroz apresenta-se em maior porcentagem. Assim, existe uma maior quantidade de sólidos para a quantidade de líquido, resultando em maior atrito superficial devido a aproximação entre os sólidos (ROSSETTO, 2017).

Quanto a incorporação do resíduo (CCA) no estado fresco, nota-se a redução na trabalhabilidade da argamassa geopolimérica, tornando a mistura altamente viscosa, enquanto a incorporação das partículas finas de metacaulim (quando não substituídas pelo resíduo) melhoram a fluidez da argamassa.

Os resultados referentes a abertura na mesa de consistência (*flow table*) são apresentadas no Gráfico 2, bem como na Figura 17.

Gráfico 2 – Índice de consistência das argamassas geopoliméricas.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Figura 17 – Ensaio na mesa de consistência (*flow table*).



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Por fim, Oliveira *et al.* (2018) afirma que a viscosidade da solução ativadora alcalina pode influenciar a viscosidade da argamassa geopolimérica, influenciando a consistência que, por sua vez, afeta a trabalhabilidade.

4.2. RESULTADOS NO ESTADO ENDURECIDO

4.2.1. Propriedades físicas: absorção de água, densidade aparente e porosidade aparente

Como esperado, a absorção de água apresentou um desempenho diretamente proporcional ao de porosidade aparente e inversamente proporcional ao de densidade aparente. Neste caso, quanto maior a porosidade aberta da amostra, maior será também sua absorção de água, relação que se justifica devido ao aumento do número de vazios.

Observa-se que nas formulações com adição de CCA, a absorção de água, assim como a porosidade aparente, decresceu quando comparada às formulações de referência, com destaque nas formulações com substituição de ambos (MK e Na_2SiO_3). Novais *et al.*, (2019) cita que à medida que ocorre a presença maior de sólidos em relação ao líquido, a mistura torna-se mais compacta, diminuindo a fase líquida e, conseqüentemente, há uma redução de poros, dificultando, assim, a entrada de água no sistema.

Contudo, apesar da formulação com teores de adição de CCA em 25% sofreram um aumento em relação ao teor de 20% de CCA, não se pode afirmar com precisão o impacto significativo da incorporação do resíduo, haja visto que o desvio padrão é elevado.

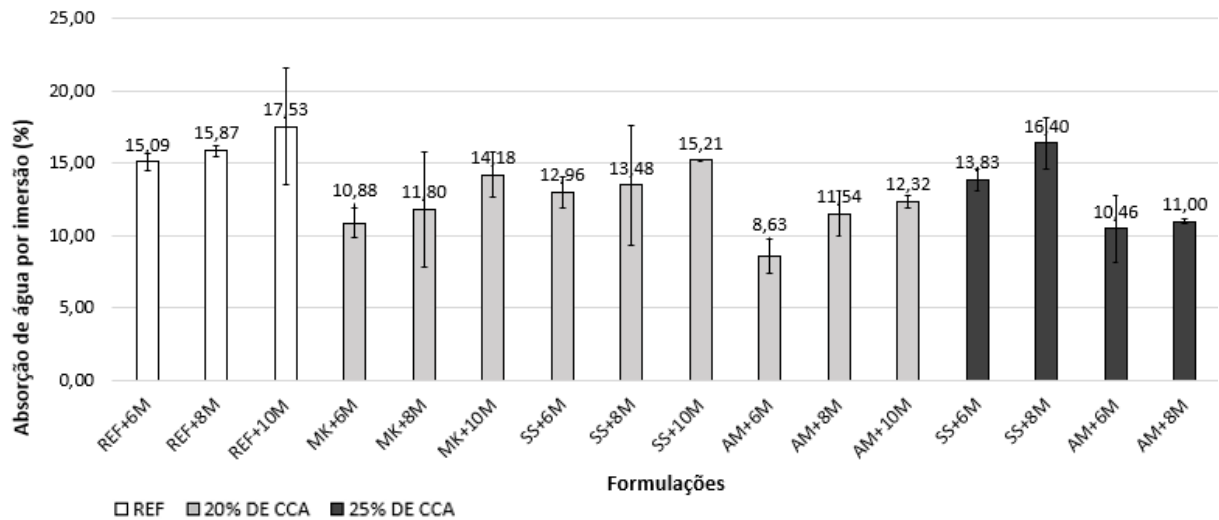
Quanto às concentrações molares de NaOH, nota-se que quando comparado a 6 M e 8 M, as formulações com 10 M obtiveram os maiores resultados de absorção de água, bem como porosidade aparente. O excesso de hidróxido de sódio, além de causar carbonatação, diminui a resistência mecânica, aumenta a porosidade e desencadeia uma imediata reação de geopolimerização, ocasionando em uma rápida cura (NARAYANAN, 2017).

De acordo com Brady e Walther (1989), o hidróxido de sódio é conhecido por acelerar a dissolução de sílica (e, portanto, aluminossilicato) em água. Wang *et al.* (2005) cita que a variação na quantidade de concentração de NaOH dentro do intervalo 4–15 mol/L afeta as propriedades físicas, bem como a resistência mecânica.

Quanto maior a concentração de NaOH, mais rápida será a dissolução de aluminossilicatos em solução, ou seja, isso implica na formação mais rápida da rede de geopolímeros, devido à rápida dissolução das cinzas. Dessa forma, os resultados obtidos nas propriedades físicas tem relação direta com as concentrações de NaOH, contudo, a compreensão da síntese de zeólitas pode ser usado para explicar alguns fenômenos cinéticos geopoliméricos nas propriedades físicas.

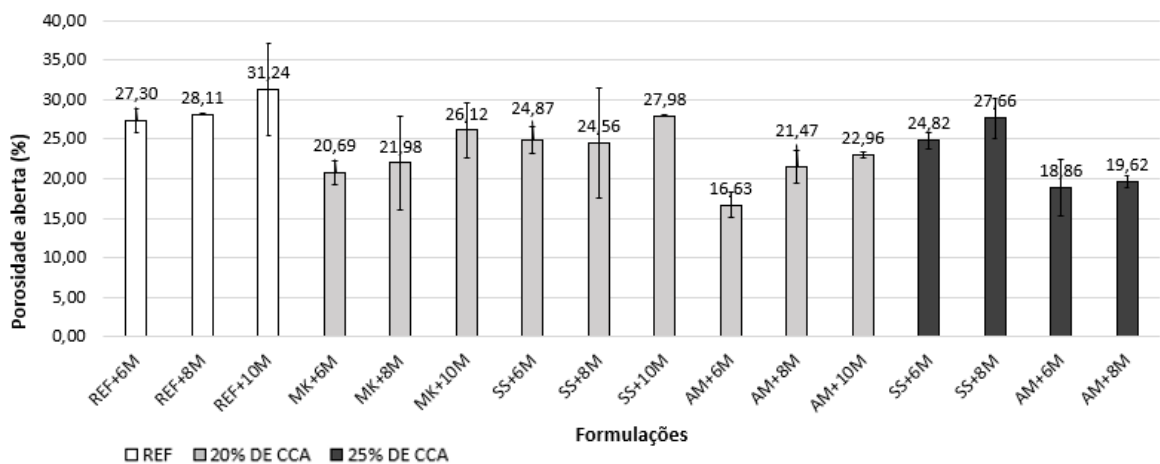
Ainda em relação ao consumo de água, Mehta e Monteiro (1994) afirmam que, para uma dada consistência da mistura, o emprego de materiais de área específica muito alta, tais como metacaulim para esse caso, tendem a apresentar necessidade maior de água, pois a área específica é predominantemente controlada pelos microporos. O que explica os resultados obtidos aos 28 dias de cura para absorção de água (Gráfico 3), bem como porosidade aparente (Gráfico 4), haja visto que, nas formulações com adição de CCA (área específica menor que a do metacaulim) os valores decresceram quando comparadas as formulações de referência.

Gráfico 3 – Absorção de água das amostras geopoliméricas.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

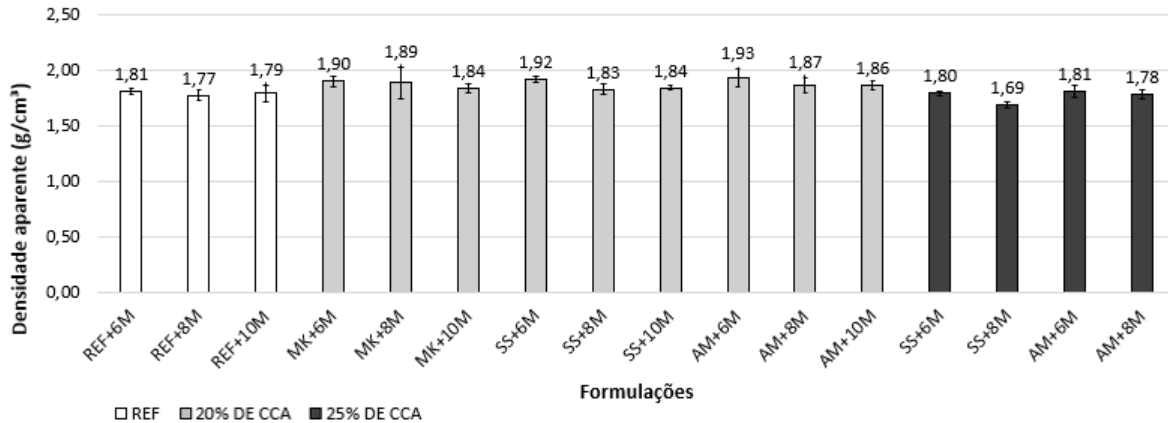
Gráfico 4 – Porosidade aparente das amostras geopoliméricas.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Vale destacar que, a água que fica livre na pasta, durante o processo de cura, evapora deixando vazios ou poros. Com o desenvolvimento de poros, há maior facilidade do material reter líquido, e por isso, os resultados de absorção aumentam (MENEZES *et al.* 2016). Dessa forma, com o maior número de vazios, a massa dos corpos de prova diminui, bem como a densidade, fato percebido nos resultados obtidos de densidade aparente (Gráfico 5) para as formulações das argamassas geopoliméricas aos 28 dias de cura.

Gráfico 5 – Densidade aparente das amostras geopoliméricas.



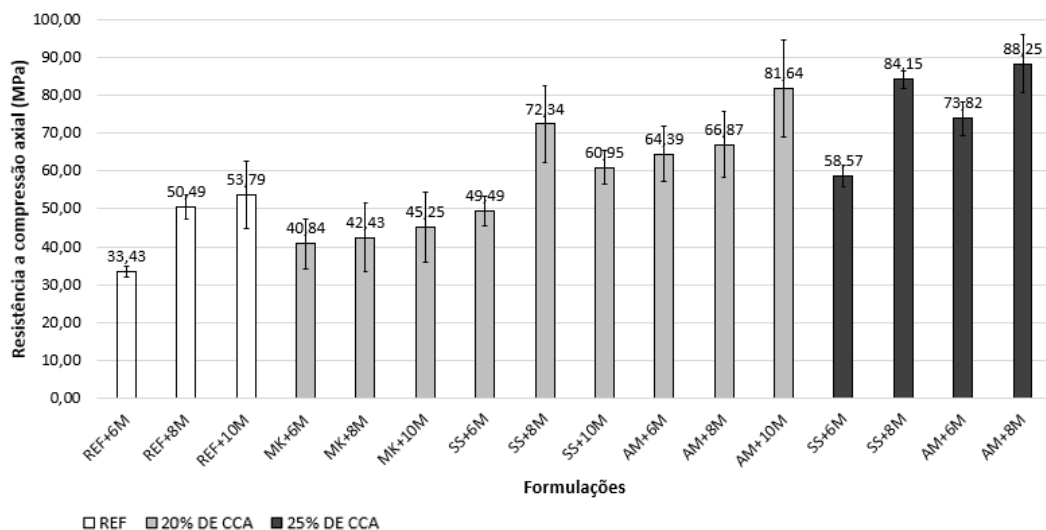
Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Todavia, com relação a densidade aparente os resultados são mais significativos quando há comparação entre matrizes porosas e densas, ao comparar matrizes com porcentagens próximas, em termos de porosidade, a análise torna-se difícil e imprecisa.

4.2.2. Propriedades mecânicas: resistência à compressão

O ensaio de compressão foi realizado aos 28 dias de cura e os resultados apresentados no Gráfico 6 correspondem à média de seis corpos de prova produzidos para cada formulação.

Gráfico 6 – Resistência à compressão das amostras geopoliméricas.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

A partir do Gráfico 6, ao analisar em conjunto, por exemplo, o conjunto das formulações de referências em (6 M, 8 M e 10 M) quando comparadas ao conjunto de substituição parcial de MK em (6 M, 8 M e 10 M) com 20% de CCA, nota-se uma queda na resistência, que pode ser explicado com retirada do MK e inclusão da CCA onde o sistema resente da falta da alumina, haja visto que o MK é fonte de sílica e alumina, enquanto a CCA é rica somente em sílica.

Ao analisar o conjunto da substituição de silicato de sódio, à medida que é tirado o líquido e adicionado o sólido (CCA) a relação S/L aumenta, de acordo com estudos onde mostram que quanto maior a relação S/L maior a resistência encontrada. Por fim quando substituídos ambos os materiais (MK e silicato de sódio) há um melhoramento das propriedades, porém nesse caso por envolver diversas variáveis a interpretação com clareza dos resultados exige novos estudos.

Com relação as concentrações molares, percebe-se que, os valores da resistência para o conjunto de formulações com 25% de CCA contendo 6 M de NaOH além de serem resistências altas, são mais sustentáveis quando comparada a 8M ou 10 M, por exemplo.

Observa-se que as formulações com substituição de silicato de sódio e substituição de ambos, apresentam maior resistência a compressão axial quando comparadas às demais formulações (REF e substituição de MK). Nesse mesmo gráfico, verifica-se a melhora na resistência a compressão das misturas com adição em 25% de CCA em relação às formulações de REF e adição em 20% de CCA.

Segundo Malhotra & Metha (1996), o bom desempenho em relação a resistência a compressão das argamassas entre 9 e 30% de adição pode ser justificado pelo fato de haver preenchimento dos vazios da argamassa, denominado efeito filler, quando há incorporação de resíduos, aumentando o empacotamento das partículas e diminuindo, conseqüentemente, os vazios, favorecendo positivamente a resistência a compressão simples.

Dentre as argamassas estudadas, a que apresentou melhor comportamento mecânico possui o teor de 25% de CCA e 8 M de NaOH (substituição de ambos), assim como apresentou uns dos menores índices de porosidade, bem como absorção de água, atingindo a resistência média de 88,3 MPa. Provis e Van Deventer (2007), afirmam que quando o teor de sílica aumenta, a velocidade da reação que ocorre na pasta de geopolímero diminui. A solidificação da pasta pode ser completamente

reacional. Com o aumento do teor de CCA, SiO_2 aumenta. Assim, a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ também aumenta, dessa forma, o produto que possui alta relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ proporciona maior resistência.

Em contrapartida, para 20% de CCA a que apresentou melhor comportamento mecânico foi com 10 M de NaOH (substituição de ambos), haja visto que, à medida que a concentração de NaOH aumenta, a solubilidade do Si e Al cresce respectivamente, contudo deve-se atentar a quantidade de sódio livre na mistura, pois seu excesso pode causar, além de carbonatação, diminuição na resistência mecânica, conforme já mencionado.

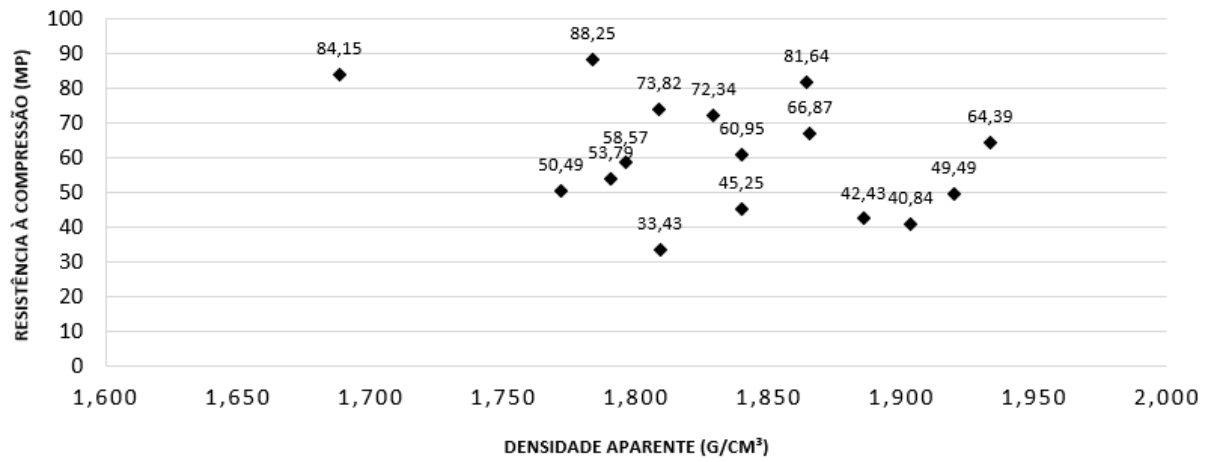
Puertas *et al.* (2000), estudaram pastas de cinzas volantes/escória e afirmam que a resistência à compressão é influenciada pela concentração de NaOH, também relatam que, a resistência à compressão aumenta com o aumento do teor de cinzas volantes/escória.

Pereira (2014), ressalta que o conhecimento atual sobre ativadores alcalinos mostram que os mais apropriados são os hidróxidos e a sílica solúvel. Apesar disso, a influência da concentração de hidróxido de sódio e a razão água/hidróxido não são totalmente compreendidas, pois não se espera que, quando diferentes materiais primários forem usados, a concentração alcalina ótima e o módulo ótimo de sílica permaneçam os mesmos.

Em resumo, a resistência tem relação direta com a quantidade de sólido e líquido incorporada na formulação, ou seja, quanto maior a relação S/L maior a resistência encontrada. Quando o teor de água é elevado, existe a tendência de formação de cristais maiores, diminuindo a área de superfície específica, levando à diminuição na resistência do material sintetizado (OLIVIA *et al.*, 2008).

A partir da análise do Gráfico 7, observa-se que não houve uma tendência bem definida nas relações entre resistência e densidade, haja visto a quantidade de variáveis sendo trabalhadas simultaneamente. Contudo, observa-se que a formulação de maior resistência a compressão obteve densidade aparente mediana.

Gráfico 7 – Relação entre a resistência a compressão e densidade aparente das amostras geopoliméricas.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

5. CONCLUSÃO

A pesquisa teve por objetivo produzir argamassas geopoliméricas com adição de cinza de casca de arroz em teores de 20 e 25%, bem como avaliar em conjunto a utilização de diferentes concentrações de NaOH.

Dessa forma, este estudo mostrou o potencial uso da CCA através da sua utilização como fonte de sílica nas formulações, por meio da dissolução do material residual rico em sílica em alternadas concentrações de hidróxido de sódio, além de apresentar oportunidades para uma maior redução do impacto ambiental.

De um modo geral, os resultados obtidos nos ensaios foram bastante satisfatórios, haja visto que argamassas produzidas com 25% de CCA e 8 M de NaOH, atingiram a resistência média de 88,3 Mpa. Contudo, ao analisar o todo, as formulações com 25% de CCA e 6 M de NaOH merecem destaque. Uma vez que, ao reduzir a molaridade de NaOH e adicionar CCA na formulação, gera uma contribuição ao meio ambiente, em função do aproveitamento de resíduos, reduzindo a necessidade de extração de matéria-prima, assim como a quantidade de energia utilizada para sua obtenção.

No que diz respeito aos materiais que foram substituídos, como metacaulim e silicato de sódio, os seus elevados valores aquisitivos tornam a produção de argamassas geopoliméricas inviáveis economicamente a construção civil. Todavia, quando se tem a oportunidade de substituir esses materiais ricos em sílicas amorfas, por um resíduo (CCA) que possua teores de sílica amorfa semelhante, considera-se um ganho no quesito sustentabilidade, além do econômico.

Contudo, vale ressaltar que, apesar do MK possuir altos teores de sílica e alumina, a CCA possui valores significativos somente de sílica. Mesmo assim, o uso do resíduo apresentou valores satisfatórios nas propriedades do estado fresco e endurecido, quando adicionada em 20 e 25% nas misturas.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolver formulações contendo adições de CCA em maiores porcentagens, por exemplo, 30% do resíduo.
- Utilizar menores concentrações molares de NaOH, bem como de metacaulim.
- Avaliar as propriedades no estado fresco e endurecido das misturas propostas

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento – Especificação**. Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland-Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2019.

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 10004: Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais pozolânicos - requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2016.

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, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta: Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2010.

AZEVEDO, A. G. S.; STRECKER, K.; LOMBARDI, C. T. Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 364, n. 371, p. 341-351, jul./set. 2018.

BECERE, O. H.; CHOTOLI, F. F. **CERTIFICADO DE MATERIAL DE REFERÊNCIA: lote 47/2019**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2019. Disponível em: http://www.ipt.br/solucoes/255-areia_normal_brasileira.htm. Acesso em: 25 fev. 2022.

BOCA SANTA, R. A. A. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2012.

BRADY, P. V. Silicate surface chemistry elevated temperatures. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Oxford, v. 56, p. 2941-12946, 1992.

BURUBERRI, L. H. **Geopolimerização de resíduos industriais para a obtenção de estruturas leves**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade de Aveiro, Portugal, 2021.

BUSCHLE & LEPPER S/A. **Ficha técnica: silicato de sódio neutro Q-79**. Departamento de gestão de qualidade, 2022.

CASCAES, M. E. L. **Desenvolvimento de geopolímero a partir do uso de metacaulim e cinza de casca de arroz**. 2016. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

CHANDRASEKHAR, S., SATYANARAYANA, K. G., PRAMADA, P. N. RAGHAVAN, P. Processing, properties and applications of reactive sílica from rice husk: na overview. **Journal of Materials Science**, Norwell, v. 38, p. 3159-3168, 2003.

DAVIDOVITS, J. **30 years of successes and failures in geopolymer applications: Market trends and potential breakthroughs**. Geopolymer Institute. Geopolymer 2022 Conference, Melbourne, Australia, 2002.

DAVIDOVITS, J. **Properties of geopolymer cements**. Geopolymer Institute. Alkaline Cements and concretes, Kiev, Ukraine, 1994.

DELLA V. P.; KUHN, I.; HOTZA, D. Caracterização da cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratário de sílica. **Química Nova**, 24(6): 778-782, 2001.

FLETCHER RA, MACKENZIE KJD, NICHOLSON CL, Shimada S. **The composition range of alumino silicate geopolymers**. *J Eur Ceram Soc* 2005;25:1471–7.

FLORIANO, F. J. **Valorização dos resíduos do processo de anodização de alumínio e cinza de casca de arroz por meio da obtenção de zeólitas**. 2014. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

FOLLETO, E. L.; HOFFMANN, R.; HOFFMANN, R. S.; PORTUGAL, U. L.; JAHN, S. L. Aplicabilidade das cinzas de casca de arroz. **Química Nova**, v. 28, p. 1055-1060, 2005.

GLASBY, T. *et al.* **Geopolymer concrete aircraft pavements at Brisbane West Wellcamp Airport**. Concrete 2015 Conference, Melbourne, Australia. 2015

KOMNITSAS K., ZAHARAKI, D. **Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry**. Minerals Engineering, 2007.

LIMA FILHO, O.F. **Histórico e uso do silicato de sódio na agricultura**. Embrapa Agropecuária Oeste: Dourados/MS, 2009. 112p.

LI, C.; SUN, H.; LI, L. **A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements**, Cem. Conc. Res., 2010.

LONGHI, M. A. Dissertação de Mestrado. **Álcali-ativação do lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia Programa de pós-graduação em engenharia civil. Rio grande do Sul, 2015.

MACCARINI, H. S. **Desenvolvimento de geopolímero a partir do uso de metacaulim**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Joinville, 2015.

MARANGON, E. *et al.* **Atividade pozolânica da sílica da casca de arroz produzida por combustão em leito fluidizado**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Gramado: IBRACON, 2013.

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

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials**. 1.ed. Amsterdam: Advances in Concrete Technology, 1996. 191p

MENEZES, J. N *et al.* Avaliação da porosidade aparente e absorção de água da massa cerâmica para porcelanato em função da incorporação de resíduo de caulim. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA**, 60. Águas de Lindóia, São Paulo. 2016.

MORAES, C. *et al.* Review of the rice production cycle: By-products and the main applications focusing on rice husk combustion and ash recycling. **Waste management and research**, v. 32, n.11, p. 1034-1048, out. 2014.

MODOLO, R. C. E. *et al.* Fly ash from biomass combustion as replacement raw material and its influence on the mortars durability. **Journal of material cycles and waste management**, v. 20, n. 2, p. 1-10, set. 2017.

NARAYANAN, A. **An Experimental Investigation on Flyash-based Geopolymer Mortar under different curing regime for Thermal Analysis**. Energy and Buildings. 2017: 539- 545

NOVAIS, R. M. *et al.* **In-depth investigation of the long-term strength and leaching behaviour of inorganic polymer mortars containing green liquor dregs**. Journal Of Cleaner Production.p. 630-641. fev. 2019.

OLIVIA, M.; SARKER, P.; NIKRAZ, H. **Water Penetrability of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete**. Conference on Constitution and Building Technol International, 2008.

OLIVEIRA, AI. M. A.; DIAS, D. P.; FRANÇA, F. C. C. Influência da viscosidade da solução ativadora alcalina na trabalhabilidade de argamassas geopoliméricas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 23, n. 3, p. 1-9, 18 out. 2018.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/v5drnPHkhJYwnh9GNbQzr9B/?lang=pt>. Acesso em: 28 fev. 2022.

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

PASUELLO, A., *et al.* **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. atual. São Paulo: Editor Geraldo C. Isaias, 2011. 1946 p.

PENNINGS, E. C. M.; GRELLNER, W. Precise nondestructive determination of the density of porous ceramics. **J. AM. Ceramics Society**, v. 72, p. 1268-1270, 1989.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza da casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 320 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PROVIS, L.; VAN DEVENTER, J. Geopolymerisation kinetics. 1. In situ energydispersive X-ray diffractometry. **Chemical Engineering Science**, v. 62, p. 2309- 2317, 2007.

PUERTAS F, Martinez-Ramirez S, Alonso S, Vasquez T. **Alkali-activated fly ash/slag cement. Strength behaviour and hydration products**. *Cem Concr Res* 2000;30:1625–32.

QUESADA, D. E.; SESÉ, M. A. F.; PEREZ, J. A. L.; MOLINA, A. I. Characterization and evaluation of rice husk ash and wood ash sustainable clay matrix bricks. **Ceramics International**, v. 43, Inssue 1, Part A. p. 463–475, 2017.

RAJAMMA, R. *et al.* Biomass fly ash efect on fresh and hardened state properties of cement based materials. **Composites part b**, v. 77, p. 1-9, ago. 2015.

RAO, F; LIU, Q. **Geopolymerization and its potential application in mine tailings consolidation: a review**. *Mineral processing and extractive metallurgy review: an international journal*, 2015.

ROCHA, G. G. N. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. 2005. 96f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte, 2005.

ROSSETTO, M. **Desenvolvimento de geopolímeros com a incorporação do lodo de Estações de Tratamento de Água**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2017

SANTOS, S. **Produção e Avaliação do Uso de Pozolana com Baixo Teor de Carbono Obtida da Cinza de Casca de Arroz Residual para Concreto de Alto Desempenho**. 2006. 267 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

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

SINGH, B.; ISHWARYA, G.; GUPTA, M.; BHATTACHARYYA, S. **Geopolymer concrete: A review of some recent developments**. Construction and Building Materials, 2015.

SORE, S. O.; MESSAN, A.; PRUD'HOMME, E.; ESCADEILLAS, G.; TSOBNANG, F. Synthesis and characterization of geopolymer binders based on local materials from Burkina Faso – Metakaolin and rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 301–311, 2016.

TASHIMA, M. M., SILVA, C. A. R. L., AKASAKI, J. L. **Concreto com adição de cinza de casca de arroz (CCA) obtida através de um processo de combustão não controlada**. In: JORNADA SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 31., 2004, Mendoza. Anais... [S. l.: s. n.], 2004.

TASHIMA, M. M.; SILVA, E. J.; AKASAKI, J. L. **Estudo de reações expansivas em argamassa de cimento portland com cinza de casca de arroz (CCA)**. Holos Environment, Rio Claro, v. 7, p. 72- 86, 2007.

TASHIMA, M. M. **Cinza de Casca de Arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Unesp- Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

TIBONI, R. **A utilização da cinza da casca do arroz de termoeletrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland**. 2007. 196f. Dissertação (mestrado) – Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

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

WALLAH, S.E.; RANGAN, B.V. **Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: Long-term properties**. Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth, Australia, p. 107, 2006.

WEERDT, K. D. **Geopolymers: State of the art**. Oslo: SINTEF Building and Infrastructure, 2011.

YOSHIDA, A. T.; BARROS, M.M. S. B. de. **Caracterização de argamassas no estado fresco – Peculiaridades da análise de argamassas industrializadas**. Simpósio brasileiro de tecnologia das argamassas, 1, 1995, Goiânia. Anais: SBTA, 1995.

XU, M. X. *et al.* **Preparation and characterization of a self-supporting inorganic membrane based on metakaolin-based geopolymers**. Applied Clay Science 115, 2015.

ZENG, S.; WANG, J. **Characterization of mechanical and electric properties of geopolymers synthesized using four locally available fly ashes**. Construction and Building Materials, 2016.