

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

MONIQUE FIN DE OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS COM A
INCORPORAÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ

Joinville

2021

MONIQUE FIN DE OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS COM A
INCORPORAÇÃO 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

2021

MONIQUE FIN DE OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS COM A
INCORPORAÇÃO 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), 23 de setembro de 2021.

Banca Examinadora:

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

Prof. Dr. Claudimir Antonio Carminatti
Universidade Federal de Santa Catarina
Membro

Prof. Dra. Valéria Bennack
Universidade Federal de Santa Catarina
Membro

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, pelo incentivo, amor, por todos os ensinamentos e pelo apoio que sempre deram.

Às minhas irmãs, que sempre estiveram ao meu lado e me apoiaram em todos os momentos. Estendendo aos meus cunhados, que são incríveis e estiveram comigo nesse período.

À minha família de Joinville. Tia, tio e seus três pequenos, obrigada por toda ajuda e por estarem sempre comigo.

Agradeço meu orientador Dr. Luciano Senff, por todo auxílio, conhecimento repassado e por compartilhar sua experiência, dedicando seu tempo no desenvolvimento dos projetos realizados, os quais foram fundamentais para meu processo de formação.

Aos amigos que conheci na Universidade e me auxiliaram durante toda graduação. De uma forma especial aqueles que me acompanharam no laboratório e no InfraTEC e sempre estiveram dispostos a me auxiliar e orientar, Eduarda S., Murilo S., Victor Hugo D. A., Vinícius K e Felipe M.. Às minhas amigas, Thaís B. e Maria Augusta C., que além de me acompanharem durante toda a jornada acadêmica, tornando-a mais leve, foram fundamentais na realização desse trabalho. Estendo ainda meu agradecimento às minhas amigas Laura S. e Naila M. que me apoiaram durante toda graduação.

Aos membros da equipe InfraTEC pela oportunidade de participar e por poder contribuir com o crescimento da equipe. O aprendizado e a amizade de todos foram fundamentais na minha trajetória.

Ao Vilson e a Patrícia, mestrandos na UFSC, por me auxiliarem e colaborarem para a execução deste trabalho.

Gostaria de agradecer também a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa no Programa Institucional de Iniciação Científica, a qual foi de suma importância para minha graduação.

Aos demais envolvidos, muito obrigada.

RESUMO

No âmbito da construção civil em todo o mundo, o cimento Portland é extensivamente utilizado, contudo sua produção consome uma quantidade significativa de energia e uma intensa emissão de gás carbônico. Nesse contexto, a busca por alternativas mais sustentáveis e menos poluentes ao meio ambiente tem ganhado visibilidade. Como opção de redução dessas emissões ao ambiente destacam-se os materiais geopoliméricos, que endurecem em razão da polimerização quando sujeitos a soluções alcalinas. Os geopolímeros geram menos gases poluentes e possuem propriedades mecânicas semelhantes às do cimento Portland. Utilizado como fonte de alumina e sílica, matérias-primas para o desenvolvimento dos geopolímeros, o metacaulim foi parcialmente substituído nessa pesquisa por cinza de casca de arroz, bem como o silicato de sódio, que juntamente com o hidróxido de sódio com concentração 10 molar, formam a solução ativadora alcalina. Como subproduto da queima da casca de arroz, utilizada para geração de energia, a cinza de casca de arroz ou CCA, é um resíduo altamente poluente quando descartado no meio ambiente, possuindo alto teor de sílica. A falta de processos adequados para o descarte ou aproveitamento da elevada quantidade produzida de CCA pelas empresas levaram a buscar alternativas que possam ser economicamente viáveis para seu fim/reuso. Com isso, a pesquisa concentrou-se em analisar as características físicas e mecânica da argamassa com o resíduo incorporado e a viabilidade da utilização da CCA nestas. A partir da substituição com 0%, 10% e 20% do metacaulim por CCA, e posteriormente, de 0%, 10% e 20% de substituição do Silicato de Sódio. Também foram realizados ensaios combinando a substituição de ambas matérias primas por CCA em teores de 5% e 10%. Pode-se concluir através da execução das misturas que no estado fresco a incorporação do resíduo na substituição de 20SN reduz significativamente a trabalhabilidade da argamassa geopolimérica, tornando a mistura viscosa. Após 28 dias de cura, estado endurecido, as formulações apresentaram, em sua maioria, um aumento na resistência à compressão. Com os referidos resultados, observou-se que pode ser utilizado o resíduo de cinza de casca de arroz em ambas substituições em teores de 10%, sem haver perda de resistência e sem alteração significativa nas propriedades físicas em relação a amostra referência. Ainda pode-se observar que, possivelmente, a falta de alumina no sistema devido a substituição do MK, prejudicou a resistência a compressão de forma mais expressiva, ressaltando que a relação silício/alumínio tem que ser a maior possível, dentro da trabalhabilidade desejada.

Palavras-chave: Geopolímero. Argamassa. Metacaulim. Silicato de Sódio. Cinza de Casca de Arroz.

ABSTRACT

In the scope of civil construction all over the world, Portland cement is extensively used; however, its production generates a significant amount of energy and consequently an intense carbon dioxide emission. In this context, the search for more sustainable and less polluting alternatives to the environment has gained visibility. As an option for reducing these emissions to the environment, geopolymeric materials that harden due to polymerization when subjected to alkaline solutions stand out. Geopolymers generate less pollutant gases and have mechanical properties similar to those of Portland cement. Used as a source of alumina and silica, raw materials for the development of geopolymers, metakaolin was partially replaced in this research by rice husk ash, as well as sodium silicate, which together with sodium hydroxide at 10 molar concentration, form the alkaline activator solution. As a by-product of burning rice husk, used for energy generation, rice husk ash, or CCA, is a highly polluting residue when disposed of in the environment, having a high silica content. The lack of appropriate processes for the disposal or utilization of the high amount of CCA produced by companies, led to the search for alternatives that may be economically feasible for its end/reuse. Thus, the research focused on analyzing the physical and mechanical characteristics of mortar with the residue incorporated and the feasibility of using CCA in them. The samples were made from 0%, 10% and 20% substitution, firstly of metakaolin by CCA, and later 0%, 10% and 20% substitution of Sodium Silicate. Samples were also made combining the substitution of both raw materials by CCA at levels of 5% and 10%. It can be concluded through the execution of the mixtures that in the fresh state the incorporation of waste significantly reduces the workability of the geopolymer mortar, making the mixture highly viscous. After 28 days of curing, the hardened state, the formulations presented, for the most part, an increase in compressive strength. With these results, it was observed that the residue can be used in both substitutions in a 10% content, without loss of strength and without much change in physical properties in relation to the reference sample. Also, it could be concluded that, possibly, the lack of alumina in the system due to the replacement of MK, impaired the compressive strength more significantly, emphasizing that the Si/Al ratio has to be as high as possible, within the desired workability.

Keywords: Geopolymer. Mortar. Metakaolin. Sodium Silicate. Rice Husk Ash.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estruturas poliméricas tridimensionais dos geopolímeros.....	16
Figura 2- Etapas do processo de geopolimerização.....	17
Figura 3- Processo de produção da CCA.....	20
Figura 4- Quadro geral das aplicações dos geopolímeros.	25
Figura 5- Aeroporto de Brisbane, Austrália.	25
Figura 6- Tubos de esgoto reparados com spray de geopolímero.	26
Figura 7- a) Metacaulim; b) Cinza de Casca de Arroz; c) Areia média grossa; d) Solução hidróxido de sódio e e) Silicato de sódio.....	27
Figura 8- Ensaio de granulometria das partículas de CCA.	28
Figura 9- Difração de raios-x da cinza de casca de arroz.....	28
Figura 10- 1) Distribuição granulométrica do metacaulim. 2) Difração de raios-X do metacaulim.....	30
Figura 11- Areia utilizada como agregado miúdo na produção das argamassas geopoliméricas.	31
Figura 12- Matérias primas utilizadas para a preparação da solução: a) Hidróxido de Sódio (10M) e b) Silicato de sódio.	32
Figura 13- Metodologia Experimental utilizada.....	33
Figura 14- Diâmetro de espalhamento da argamassa geopolimérica de 20% de substituição de SN.	34
Figura 15- Procedimento para preparação das argamassas geopoliméricas.....	35
Figura 16- Equipamentos utilizados para a produção das argamassas: a) Misturador mecânico; b) balança de precisão (0,01); c) moldes.	35
Figura 17- Corpos de prova em processo de cura a temperatura ambiente.....	36
Figura 18- Ensaio de mesa de consistência (Flow Table) realizado no estado fresco.....	37
Figura 19- Ensaio de resistência à compressão.	38
Figura 20- Equipamentos para propriedades físicas: estado endurecido. a) Ensaio de Arquimedes, b) Estufa.	39
Figura 21- Corpos de prova: (a) após secagem na estufa e b) imersos em água.	39
Figura 22- Valores dos espalhamentos das argamassas na mesa de consistência: a) REF b)10 MK c) 20 SN.....	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Absorção de água das argamassas geopoliméricas com 28 dias de cura.	42
Gráfico 2- Densidade aparente das argamassas geopoliméricas com 28 dias de cura.	43
Gráfico 3- Relação entre densidade aparente e absorção de água das amostras aos 28 dias de cura.	43
Gráfico 4- Porosidade aparente das argamassas geopoliméricas aos 28 dias de cura.	44
Gráfico 5- Resistência à compressão das argamassas geopoliméricas aos 28 dias.	45
Gráfico 6- Relação entre resistência à compressão e densidade aparente das argamassas geopoliméricas aos 28 dias de cura.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química da CCA, em percentual de óxidos normalizados em 100%. .29	29
Tabela 2- - Composição química do Metacaulim.....30	30
Tabela 3- Características do hidróxido de sódio.31	31
Tabela 4- Composição química do silicato de sódio.31	31
Tabela 5- Formulações utilizadas na produção das misturas geopoliméricas.34	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CCA – Cinza de Casca de Arroz

REF – Geopolímero referência

NBR – Norma Brasileira

σ – Tensão

μm – Micrometro

Al – Alumínio

Al_2O_3 – Óxido de Alumínio (Alumina)

Ca – Cálcio

CERMAT – Núcleo de Pesquisas em Materiais Cerâmicos e Compósitos

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

CO_2 - Dióxido de Carbono (gás carbônico)

cm – Centímetros

CP – Cimento Portland

DRX – Difração por raio-X

g – Gramas

H_2O – Água

K – Caulinita

kN – Quilonewton

K_2O – Óxido de Potássio

KOH – Hidróxido de Potássio

M – Molar

MK – Metacaulim

mm – Milímetro

MPa – Megapascal

Na – Sódio

Na_2O – Óxido de Sódio

NaOH – Hidróxido de Sódio

O – Oxigênio

OH – Hidroxila

rpm – rotação por minuto

Q – Quartzo

S/L – Sólido/Líquido

Si – Silício

SiO₂ – Óxido de Silício (Sílica)

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	GEOPOLÍMERO	15
2.1.1	Metacaulim	18
2.1.2	Ativadores	18
2.2	CINZA DE CASCA DE ARROZ	19
2.3	PROPRIEDADES DOS GEOPOLÍMEROS	21
2.3.1	Estado Fresco	21
2.3.1.1	Reologia.....	22
2.3.2	Estado Endurecido	23
2.3.2.1	Propriedades Físicas	23
2.3.2.2	Propriedades Mecânicas	23
2.4	APLICAÇÕES DOS GEOPOLÍMEROS	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	MATERIAIS	27
3.1.1	Cinza de Casca de Arroz	27
3.1.2	Metacaulim	29
3.1.3	Agregado miúdo	30
3.1.4	Hidróxido de sódio (NaOH) e Silicato de Sódio (Na₂SiO₃)	31
3.2	METODOLOGIA ADOTADA.....	32
3.2.1	Formulações das argamassas geopoliméricas	33
3.2.2	Ensaio realizado nas argamassas no estado fresco	36
3.2.3	Ensaio no estado endurecido	37
3.2.3.1	Ensaio de resistência à compressão (MPa).....	37
3.2.3.2	Propriedades físicas: absorção de água (%), densidade aparente (g/cm ³) e porosidade aberta (%)	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	RESULTADO DA MESA DE CONSISTÊNCIA (FLOW TABLE).....	40

4.2	RESULTADOS NO ESTADO ENDURECIDO	41
4.2.1	Propriedades físicas: absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta	41
4.2.2	Resistência à Compressão.....	44
5	CONCLUSÃO	47
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	48
	REFERÊNCIAS.....	49

1. INTRODUÇÃO

A partir do crescimento das cidades e da maior exigência por qualidade de vida, a demanda por alternativas sustentáveis tem crescido nas últimas décadas. Todavia a construção civil possui papel fundamental nesse crescimento e relacionado a isso, está entre os setores que mais degradam o meio ambiente durante a produção de seus materiais.

Considerando que a produção do Cimento Portland (CP), material amplamente utilizado na indústria da construção civil, cuja fabricação promove a liberação de expressiva quantidade de CO₂ para a atmosfera, percebe-se que a possibilidade de utilização de outros materiais com características semelhantes, como materiais álcali-ativados, sejam uma forma de minimizar o impacto ambiental. Conhecidos como geopolímeros, esses materiais ricos em aluminossilicatos apresentam vantagens quando comparados ao Cimento Portland, como elevada resistência mecânica, resistência a ataques ácidos e de sulfatos, estabilidade estrutural quando submetidos a elevadas temperaturas, entre outras vantagens (AZEVEDO; STRECKER; LOMBARDI, 2018).

A construção civil, nesse contexto, tem demonstrado cada vez mais interesse na utilização de resíduos decorrentes de outros processos, buscando por novas alternativas que gerem menos poluentes, sendo classificadas como sustentáveis.

Em conjunto com a problemática ambiental abordada, os resíduos que são descartados de forma inadequada e possuem larga escala de geração vem sendo estudados e analisados como forma de reuso em outros materiais. Diante disso, a cinza de casca de arroz, conhecida como CCA, subproduto originado a partir da queima da casca de arroz para geração de energia, pode ocasionar problemas ambientais quando não descartada ou reaproveitada de maneira correta devido a presença de carbono residual em sua composição (TASHIMA, 2006).

Com foco na problemática ambiental e no resíduo gerado pela queima da casca de arroz ter alta concentração de sílica de natureza amorfa, propõe-se uma pesquisa para analisar as propriedades físicas e mecânicas de materiais como argamassas geopoliméricas desenvolvidas com a incorporação de CCA em substituição parcial do metacaulim e também do silicato de sódio, a partir de porcentagens pré-determinadas e, posteriormente, em substituição parcial dos dois materiais em conjunto por CCA em outros teores. A cinza de casca de arroz utilizada no trabalho de conclusão de curso foi fornecida pela Silcca Nobre.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a influência da cinza da casca de arroz nas propriedades físicas e mecânicas no estado fresco e endurecido de argamassas cimentícias.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Verificar o efeito no estado fresco das argamassas com a incorporação do resíduo de cinza de casca de arroz;
- Avaliar a influência da incorporação do resíduo no estado endurecido (ensaio de resistência à compressão) aos 28 dias de cura;
- Determinar algumas propriedades físicas e mecânica das argamassas geopoliméricas;
- Comparar as argamassas com substituição do metacaulim, argamassas com substituição do silicato de sódio e argamassas com substituição parcial dos dois componentes pelo resíduo.

2. 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados assuntos e definições relevantes sobre o tema estudado. A fundamentação teórica está subdividida em tópico relacionado ao resíduo de cinza de casca de arroz e tópico sobre a argamassa geopolimérica. Entre os assuntos relacionados ao geopolímero, serão tratados diversas definições, as matérias primas necessárias e as suas principais propriedades no estado fresco e endurecido, analisando a aplicação deste na construção civil. Quanto à fundamentação teórica relativa ao resíduo, destacam-se os processos utilizados para obtenção e processo de geração e suas principais características.

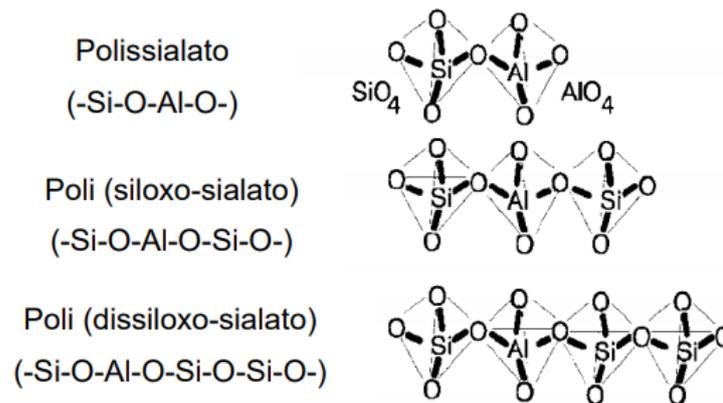
2.1 GEOPOLÍMERO

O termo geopolímero foi criado pelo francês Davidovits na década de 1970, sendo caracterizado como polímeros inorgânicos em que a obtenção é dada pela polimerização de

matérias primas naturais que possuem aluminossilicatos (PINTO, 2006). Por meio de estudos químicos e mineralógicos, Davidovits (2002) constatou que os blocos das pirâmides do Egito não eram formados de pedra calcária natural, mas de uma mistura de calcário caulínico e hidróxido de sódio (NaOH), formando uma matriz predominante de calcita (CaCO_3) com estruturas amorfas de aluminossilicatos, compostos presentes e característicos dos materiais geopoliméricos.

O geopolímero é formado a partir de uma reação de geopolimerização, ou policondensação. 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, representado na Figura 1 (RAO; LIU, 2015). Feng et al. (2012) conceituam geopolímeros como estruturas desenvolvidas pela condensação de elementos tetraédricos de aluminossilicato com íons de metais alcalinos que balanceiam as cargas associadas às estruturas tetraédricas de alumínio.

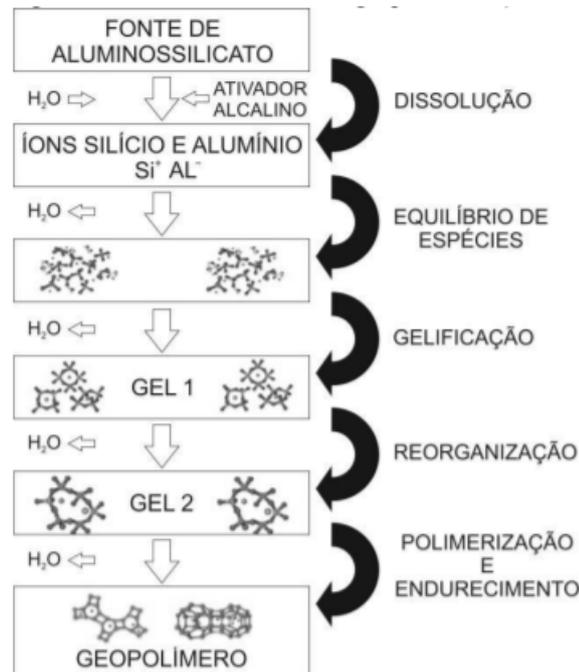
Figura 1- Estruturas poliméricas tridimensionais dos geopolímeros.



Fonte: Davidovits (1994).

Segundo Livi e Repette (2015), este processo de geopolimerização compreende as etapas de dissolução dos sólidos e transferência das unidades dissolvidas para uma fase gel, seguida de reorganização e, conseqüentemente, polimerização e enrijecimento da argamassa. Essas etapas estão ilustradas na Figura 2.

Figura 2- Etapas do processo de geopolimerização.



Fonte: Cesari (2015) apud Rossetto (2017).

Resíduos que apresentam uma quantidade adequada de sílica e alumina na forma amorfa à semicristalina podem ser utilizados na fabricação de geopolímeros (BHARATH, 2017). Com isso, eles aceitam em sua formulação a utilização de matérias-primas naturais e resíduos industriais, podendo assim, diminuir os custos de sua produção e o impacto ambiental (BOCA SANTA, 2012).

A produção de cimentos geopoliméricos versáteis e de bom custo benefício que podem ser misturados e endurecidos essencialmente como o cimento Portland, representa uma mudança e avanço nessa área, revolucionando a construção de infraestrutura de transportes e a indústria da construção (DAVIDOVITS, 2013).

Dessa forma, os geopolímeros são compostos formados basicamente por uma fonte de aluminossilicatos, exemplo o metacaulim, e um ativador alcalino, comumente utilizado o hidróxido de sódio ou potássio. De modo a obter geopolímeros com características específicas, como grau de resistência à compressão ou retração, algumas relações entre componentes químicos devem ser consideradas, como Si/Al , Na/Si , Na/Al , H_2O/Na e relação S/L (WEERDT, 2011).

2.1.1 Metacaulim

De acordo com Cesari (2015), qualquer composto que possua alumínio e silício em sua matriz tem potencial de ser fonte de aluminossilicatos no processo de geopolimerização. Das matérias primas mais utilizadas para a sintetização de geopolímeros pode-se citar o metacaulim, pozolanas naturais, cal, cinza de casca de arroz, entre outros.

O metacaulim é um material predominantemente amorfo, obtido ao moer argilas caulínicas e caulins de alta qualidade, com baixos teores de impurezas, em elevadas temperaturas. O prefixo “meta” remete-se a mudança e “caulim” é originado do termo chinês “Kauling”, ou “colina alta” que se refere a uma região montanhosa de Jauchau Fu, em que o material obtido é composto de caulinita (SILVA, 2001). Segundo Monte et al. (2003), a composição química dos caulins compreende cerca de 45,54% de SiO₂, 39,50% de Al₂O₃, 13,96% de H₂O, e demais elementos em menores quantidades.

Como fonte de alumina e sílica termicamente ativado, com alta atividade pozolânica, o metacaulim tem sido amplamente utilizado podendo obter características cimentícias quando sujeito a ativação alcalina, formando os geopolímeros. 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 adicionado na matriz geopolimérica, a dispersão das partículas não afeta consideravelmente o comportamento reológico e o grau de reação álcali-ativado.

2.1.2 Ativadores

Como mencionado anteriormente, o processo de geopolimerização ocorre em condições altamente alcalinas entre aluminossilicatos e um ativador químico em meio aquoso (DAVIDOVITS, 2013).

Palomo et al., (1999) definem a ativação alcalina como um processo químico que transforma estruturas vítreas (amorfas, parcialmente amorfas ou metaestáveis) em um material cimentício compacto. As partículas do material fonte de aluminossilicatos dissolvem-se ao entrarem em contato com a solução ativador, ocorrendo a quebra das ligações originais da matéria-prima (CESARI, 2015).

De acordo com Jiménez (2009) apud Cesari (2015), a concentração molar resulta em um acréscimo de resistência dependendo do tipo de material utilizado como ativador químico e a quantidade de íons hidroxila disponíveis na solução após o contato com a água. Os mais

utilizados são os a base de sódio Na^+ , como o hidróxido de sódio (NaOH) e o silicato de sódio (Na_2SiO_3) e potássio K^+ , como o hidróxido de potássio (KOH) (HARDJITO; RANGAN, 2005).

A utilização de NaOH e Na_2SiO_3 para a produção de geopolímeros é mais tradicional devido aos custos não serem elevados e por terem maior disponibilidade. Segundo Ming et al., (2016) as soluções com hidróxido de sódio são mais viscosas e reagem a um teor mais rápido, podendo formar uma estrutura mais porosa e provocar uma redução na resistência mecânica.

Para Konmitsas et al. (2007), em contato com o ar, o excesso de ativador pode gerar carbonato de sódio, ou seja, o ativador ideal é aquele que se encontra na concentração suficiente para que ocorra o balanceamento das cargas de Si^{4+} e Al^{3+} , considerando a origem do material escolhido e qual geopolímero se quer produzir. De acordo com Olivia et al. (2008), a concentração de NaOH deve-se apresentar na faixa de 5 a 16 molar.

O silicato de sódio, formado a partir da síntese da areia e carbonato de sódio a temperaturas acima de 1000°C , é largamente empregado na indústria por possuir propriedades de estabilidade química, viscosidade, modificador de cargas superficiais e capacidade de polimerização (SILVA, 2011).

Com isso, segundo Ming et al. (2016), para o processo de dissolução é utilizado o hidróxido alcalino, e atuando como ligante, reagente e dispersante, o silicato alcalino. Portanto, a associação entre silicato de sódio e o hidróxido de sódio forma um ligante que melhora o aumento da resistência à compressão do geopolímero (HWANG, HUYNH, 2015).

2.2 CINZA DE CASCA DE ARROZ

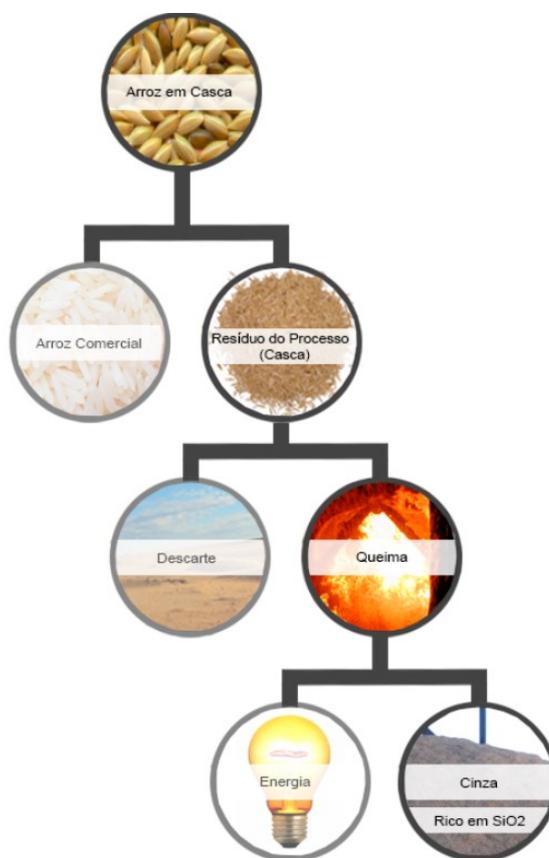
Planta originária de espécies selvagens de gramíneas do sudeste da Ásia, o arroz contém grandes quantidade de silicatos. Atualmente, caracteriza-se como o terceiro alimento que mais possui áreas cultivadas no Brasil, concentrando-se essas na região Sul (NUERNBERG, 2018). Caracterizado por se adaptar a diferentes tipos de solo e diferentes condições climáticas, a cultura do arroz é praticada em todos os continentes. Em Santa Catarina, região de forte colonização italiana, a cultura do arroz foi implantada ainda no início do século XX (CONAB, 2016).

O arroz compreende uma série de etapas e processos após a colheita até o produto final, sendo uma delas caracterizada como processo de beneficiamento que se dá pelo descascamento, separação pela câmara de palha, separação de marinheiro, brunição, homogeneização e classificação (EIFERT, 2009). Desse processo, promove-se dois produtos, o grão para a

alimentação e o farelo, que é utilizado na produção de óleos, rações e farinhas. A casca do arroz, que corresponde a 23% do total em volume de grão, é considerada um subproduto (DELLA et al., 2001).

A casca de arroz, um material fibroso, constituída de 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de resíduos inorgânicos. De acordo com Houston (1972) apud Silva (2009), esses resíduos inorgânicos possuem de 95 a 98% de sílica na forma amorfa hidratada. Por não possuir valor nutricional significativo, a casca torna-se inviável na alimentação de animais, e sua composição siliciosa a torna imprópria para degradação natural. Sendo assim, este sub produto é utilizado na forma de combustível em caldeiras para geração de energia para o próprio beneficiamento do arroz. A produção da cinza de casca de arroz está representada na Figura 3.

Figura 3- Processo de produção da Cinza de casca de arroz (CCA).



Fonte: Silroz (2021).

A partir da queima da casca de arroz para a produção de energia resulta-se o CCA. A coloração da cinza de casca de arroz pode variar de acordo com o teor de carbono presente, podendo ser branca rosado, até uma tonalidade escura, de cor preta. Apresentando-se como uma opção para a obtenção de sílica amorfa (composição de 90-95% em peso da SiO_2 amorfa), com

alto grau de reatividade, a queima deve ser controlada, sob temperatura na faixa de 500° C a 700° C e tipo de forno adequado (AVILA, 2018).

Segundo Silva (2009), a cinza de casca de arroz, quando submetida a processos adequados, caracteriza-se como uma pozolana, produto sílico-aluminoso, que ao atingir a fase amorfa se solubiliza em meio alcalino e reage com CaO, resultando em silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), produto gerado no processo de hidratação do cimento Portland. Segundo o mesmo autor, Silva (2009), para aprimorar a condição de pozolanicidade, é fundamental que a CCA passe por um processo de moagem, reduzindo sua granulometria.

2.3 PROPRIEDADES DOS GEOPOLÍMEROS

Segundo Xu et al., (2015) e Zeng e Wang (2016), os geopolímeros são identificados com características de alta resistência à compressão, durabilidade, baixa retração, baixa condutividade térmica, resistência ao fogo, resistência à corrosão, e resistência à umidade.

De modo a conhecer as características e propriedades dos geopolímeros é de extrema importância compreender seu comportamento desde o estado fresco até o estado endurecido, além de sua reologia.

2.3.1 Estado Fresco

De acordo com Pinto (2006), os geopolímeros caracterizam-se por possuírem propriedades no estado fresco como: boa coesão, boa trabalhabilidade e acabamento superficial, o que resulta em ganho de resistência mecânica e dureza superficial rapidamente.

No estado fresco, de todas as propriedades que podem ser analisadas, a trabalhabilidade é fundamental. Variando a aplicação, a trabalhabilidade é responsável pela consistência, plasticidade e facilidade de mistura da argamassa. A argamassa geopolimérica nesse estado encontra-se similar a um material fluido (ROSSETTO, 2017). Contudo, Vassalo (2013) comenta que estudos demonstram que as propriedades dos geopolímeros são afetadas por pequenas alterações na relação Si/Al disponíveis, sendo assim fundamental o controle dos materiais para atingir propriedades desejáveis no estado endurecido.

2.3.1.1 Reologia

A reologia pode ser definida como a ciência que estuda o escoamento e o comportamento da fluidez dos materiais, suas propriedades mecânicas e deformação, quando submetidos a determinada tensão ou força externa. O termo foi criado por Bingham em 1929 e é originado da palavra grega *rhein* que significa “escorrer” (REIS, 2008).

Segundo Reis (2008), a viscosidade pode ser entendida como um dos principais parâmetros reológicos. Correspondente a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento de um material, ou seja, velocidade de deformação de um corpo. A viscosidade está diretamente ligada ao teor de água, à origem mineralógica e a dimensão e forma dos agregados. Portanto, a viscosidade de um material estará diretamente ligada a sua resistência ao escoamento.

Os geopolímeros podem ser classificados como fluidos de Bingham por possuírem um valor de tensão residual de cisalhamento inicial que deve ser ultrapassada para que o material apresente um fluxo viscoso. O modelo de Bingham é representado por meio da equação:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad \text{Eq. 1}$$

em que as grandezas são tensão de cisalhamento (τ), a tensão de escoamento (τ_0), a viscosidade plástica (μ) e a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) (SENEFF et al., 2009).

O estudo da reologia das argamassas tem se mostrado como importante ferramenta para análise da viscosidade e tensão de escoamento das misturas. Sua aplicação proporciona classificar os materiais, analisar seus comportamentos frente a um campo de tensão, relacionar estes comportamentos com sua estrutura, bem como prever o desempenho dos materiais em outros estágios de tensão, deformação, tempo e temperatura (TANNER, 1998 apud MACCARINI, 2015).

A falta de controle e conhecimento dos materiais no estado fresco impactará no teor de água e, com isso, nas características após o período de cura como na retração, porosidade, resistência mecânica, durabilidade, e ainda tempo de pega, uma vez que este determinará o prazo de utilização de pastas e argamassas com plasticidade e trabalhabilidade adequada (MACCARINI, 2015).

2.3.2 Estado Endurecido

Aos 28 dias de cura, com o endurecimento do geopolímero, aumento da resistência, e com as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais já estabilizadas, é possível realizar os ensaios para caracterização das misturas. O estado endurecido é possível dividir em propriedades físicas e mecânicas.

2.3.2.1 Propriedades Físicas

Importante o conhecimento das propriedades físicas pois estas influenciam nas propriedades mecânicas. Aos 28 dias de cura dos corpos de prova e por meio da lei de Arquimedes, relaciona-se os três tipos de massa: seca, imersa e superfície seca, a partir da secagem na estufa, imersão em água e secagem superficial, são obtidas as propriedades de absorção, densidade e porosidade do material.

2.3.2.2 Propriedades Mecânicas

Utilizado como parâmetro fundamental para os cálculos estruturais da área da construção civil, destaca-se a resistência à compressão. Porém, a análise da capacidade do material de resistir a esforços de tração e cisalhamento também é importante.

A distribuição do tamanho das partículas, a natureza amorfa da matéria-prima sólida, relação Si/Al, concentração do ativador, entre outros fatores citados por Xu et al. (2001) apud Komnitsas et al. (2007), e a temperatura e tempo de cura descritos por Palomo et al. (1999), podem influenciar na resistência mecânica dos geopolímeros.

2.4 APLICAÇÕES DOS GEOPOLÍMEROS

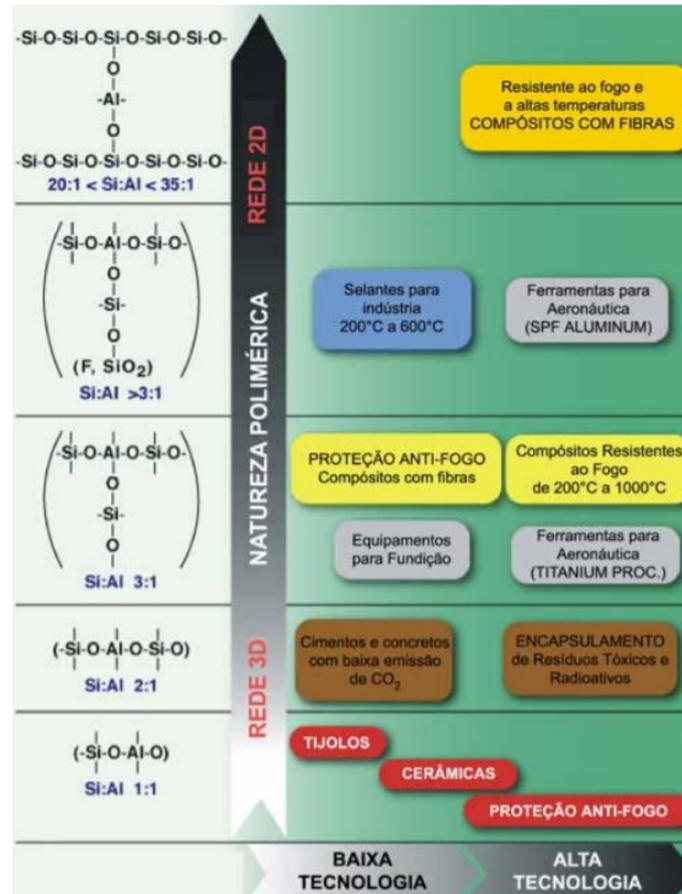
Possibilitando um grande potencial de utilização em diversas áreas da indústria e construção civil, os materiais geopoliméricos apresentam alta resistência mecânica, resistência ao gelo e degelo e excelente comportamento a frente ao fogo. Ainda, segundo Davidovits (2011), a relação silício/alumínio faz com que estes materiais sejam utilizados como isolantes térmicos, telhas cerâmicas, materiais de construção de baixa tecnologia, bio-materiais, cimentos, componentes para indústria de fundição, refratários, cimento e concretos, entre outros.

De acordo com Pinto (2006), o desenvolvimento desses materiais geopoliméricos se direciona a duas linhas de atuação, sendo a primeira orientada à produção de materiais de baixo custo, para utilização em quantidade elevada, como materiais de construção. E a segunda linha, orientada à obtenção de materiais mais sofisticados e mais caros, considerando a incorporação de fibras de variados tipos. Esses materiais da segunda linha podem substituir com vantagem plásticos, alguns metais e até produtos cerâmicos.

Para relações de Silício/Alumínio mais baixas segundo Pinto (2006), são geradas estruturas tridimensionais do tipo zeolítico, favorecendo as elevadas resistências mecânicas, correspondendo aos materiais de construção, ligantes ou encapsulamento de produtos tóxicos. Ainda segundo o autor, em razão da relação Silício/Alumínio, as características e o envolvimento de maior ou menor intervenção tecnológica afetarão os materiais.

Com o aumento da razão Si/Al obtém-se materiais de caráter polimérico maior, com cadeias mais largas e com isso mais adequadas a outros tipos de aplicação (PINTO, 2006). Davitovits (1999), representa em um quadro (Figura 4) adaptado por Pinto (2006), com os tipos possíveis de materiais em função das razões, do campo de aplicação e do envolvimento tecnológico.

Figura 4- Quadro geral das aplicações dos geopolímeros.



Fonte: Davidovits (1999) apud Pinto (2006).

Uma das grandes aplicações foi na Austrália, em 28 de setembro de 2014, em que o Aeroporto de Brisbane West Wellcamp (Figura 5) foi construído, pela empresa Wagner EFC, utilizando cerca de 100.000 toneladas de concreto geopolimérico, refletindo em uma redução de 6,6 mil toneladas de emissão de CO_2 (GEOPOLYMER INSTITUTE, 2014).

Figura 5- Aeroporto de Brisbane, Austrália.



Fonte: The Geopolymer Institute (2014).

Outra aplicação do cimento e concreto geopolimérico é a utilização na reparação estrutural externa e interna de infraestruturas, como pontes que degradam devido à corrosão e em sistemas de tubulações, como foi realizado pelas empresas Inland Pipe Rehabilitation (IPR) em conjunto com a Milliken Infrastructure Solutions, na utilização de geopolímeros em spray para reparos de tubos de esgoto de grande diâmetro, como representado na Figura 6 (PLASTICS TODAY, 2014).

Figura 6- Tubos de esgoto reparados com spray de geopolímero.



Fonte: Plastics Today (2014).

3. 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Serão apresentados os materiais utilizados na pesquisa, os equipamentos para o desenvolvimento das argamassas geopoliméricas, assim como os métodos empregados para a realização dos corpos de prova e ensaios físicos/mecânicos.

Primeiramente, foi definida a dosagem a ser utilizada. Além disso, alguns testes foram realizados na mesa de consistência para validação da relação sólido/líquido. Esses dados são comuns em todos os corpos de prova

A produção dos corpos de prova e a realização dos ensaios laboratoriais foram executados no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável (LabIconS), localizado na UFSC Joinville-CTJ. Para alguns ensaios de caracterização das argamassas, este trabalho contou com o apoio da Perville Engenharia e Empreendimentos, o Núcleo de Pesquisa em Materiais Cerâmicos e Compósitos (CERMAT) do Departamento de Engenharia Mecânica UFSC –

Florianópolis e o Centro de Investigação de Materiais Cerâmicos e Compósitos (CICECO), em Portugal.

3.1 MATERIAIS

Na produção das argamassas geopoliméricas foram utilizados os seguintes materiais (Figura 7): Metacaulim (MK); Cinza de casca de arroz como fonte de Si e Al; Solução de NaOH (10 molar); Silicato de sódio (SN), como agente ativador alcalina e Areia média grossa como agregado miúdo.

Figura 7- a) Solução hidróxido de sódio 10M ; b) Silicato de sódio; c) Cinza de Casca de Arroz; d) Areia média grossa e e) Metacaulim.



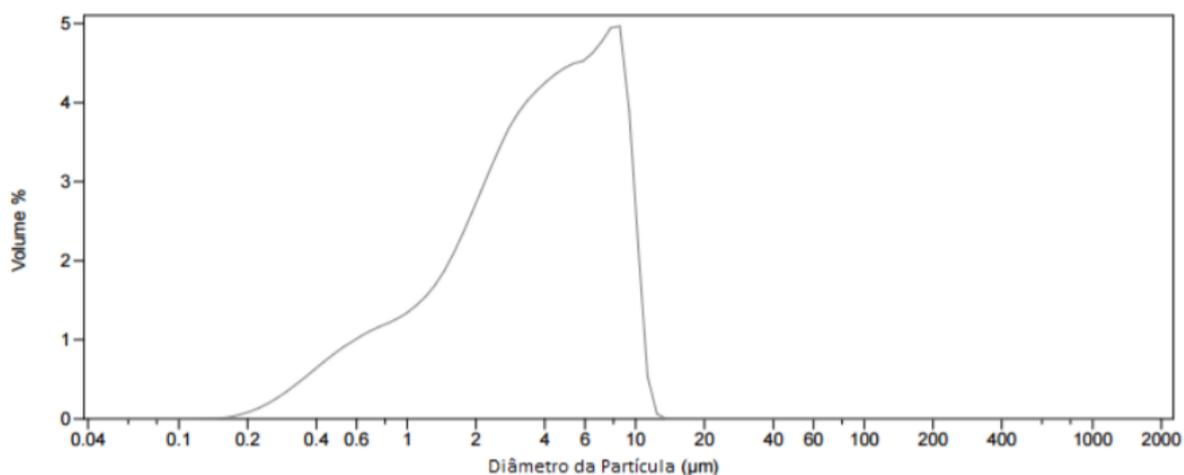
Fonte: Autora (2021).

3.1.1 Cinza de Casca de Arroz

O cinza de casca de arroz (CCA) utilizada nessa pesquisa é proveniente empresa Silcca Nobre, que faz parte da Usina Termoelétrica Sílica Verde do Arroz (SVA), do grupo Pilecco Nobre que produz a sílica de casca de arroz.

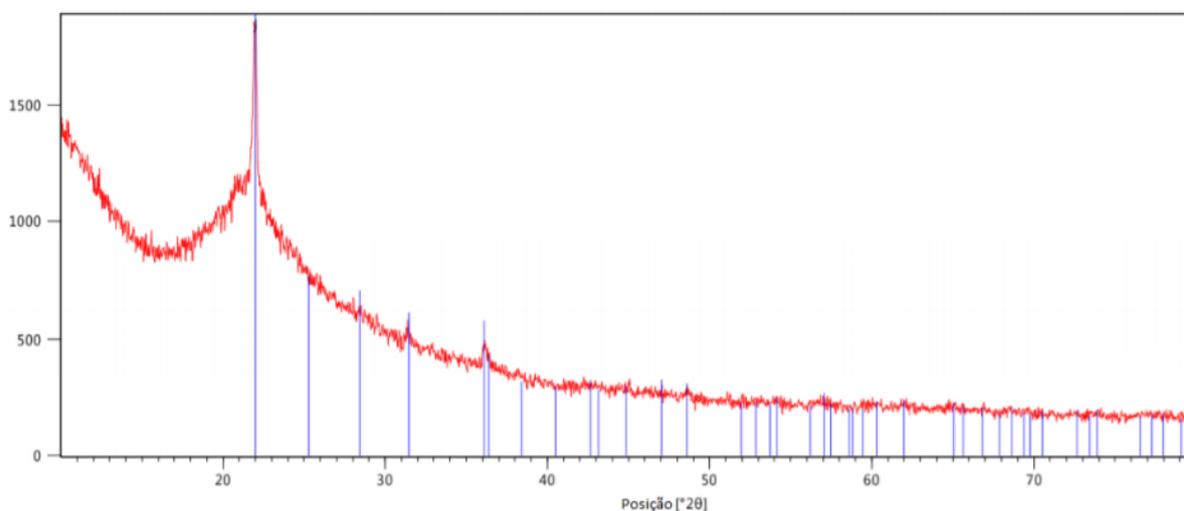
De forma a verificar a composição da CCA e sua granulometria, foram utilizados resultados de ensaios anteriores no Centro de Investigação de Materiais Cerâmicos e Compósitos (CICECO), em Portugal. Pela análise da granulometria e difração de raios-x (Figura 8 e 9) verificou-se que o tamanho médio das partículas corresponde a $4,208 \mu\text{m}$, apresentando, segundo Marangon et al. (2013), uma área específica de $21,142 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Figura 8- Ensaio de granulometria das partículas de CCA.



Fonte: CICECO (2017).

Figura 9- Difração de raios-x da cinza de casca de arroz.



Fonte: CICECO (2017).

De acordo com a análise dos gráficos e com Marangon et al. (2013) apud Lobo (2017), pode-se concluir que nem todo o material é reativo, mesmo possuindo estrutura

predominantemente amorfa, representada no difratograma pelo alargamento dos picos, indicando a presença de parte cristalina.

As composições da cinza de casca de arroz são apresentadas na Tabela 1. Segundo a NBR 12653/2014, a classificação de pozolanas limita o teor de perda ao fogo em valor máximo de 6%, atendendo assim, a CCA em estudo. Com isso, nota-se que por ser uma importante fonte de sílica, esta pode ser utilizada na relação Si/Al do material.

Tabela 1- Composição química da CCA, em percentual de óxidos normalizados em 100%.

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).

3.1.2 Metacaulim

O metacaulim é um elemento silicoso amorfo gerado através da calcinação de argilas caulínicas, refinadas ou puras, em altas temperaturas, seguida da moagem (FIGUEIREDO et al., 2014).

Como fonte de aluminossilicatos e seguindo as especificações da norma NBR 15894/10, foi utilizado o metacaulim, disponibilizado pela empresa Metacaulim Brasil. O Núcleo de Pesquisa CERMAT em 2015 desenvolveu ensaios de caracterização do material e pelo ensaio de fluorescência de raios-X, foi determinada a composição química do metacaulim, em que é possível analisar que o metacaulim é composto em sua maior parte por Al₂O₃ (32,6%) e SiO₂ (57,12%), como apresentado na Tabela 2.

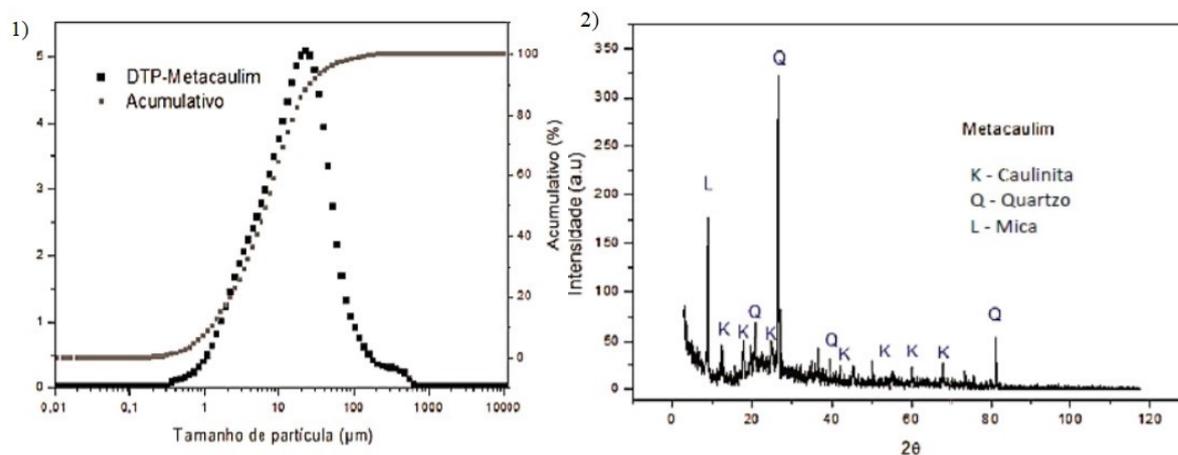
Tabela 2- Composição química do Metacaulim.

Óxidos	Al ₂ O ₃	CaO	FeO ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
Teor (%)	32,6	0,08	2,26	2,13	0,59	<0,05	<0,05	0,06	57,12	1,51
Perda ao Fogo	2,62%									
Área Específica	32700 m ² /kg									

Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT (2015).

O mesmo núcleo de pesquisa, a partir do método de difração de raios-X determinou o grau de cristalinidade dos componentes e as fases cristalinas como a mica (L), caulinita (K) e o quartzo (Q), Figura 10. E pelo ensaio de distribuição do tamanho de partículas foi verificado que o tamanho médio das partículas é de 21 µm e D50 = 6,5 µm.

Figura 10- 1) Distribuição granulométrica do metacaulim. 2) Difração de raios-X do metacaulim.



Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT (2015).

3.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia média grossa (#30) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Utilizado por todos os laboratórios nacionais que realizam ensaios físicos-mecânicos e estabelecida como material de referência na norma ABNT NBR 7214: 2015- Areia normal para ensaio de cimento, a areia normal brasileira exige controles específicos de materiais e capacitação técnica e laboratorial.

Figura 11- Areia utilizada como agregado miúdo na produção das argamassas geopoliméricas.



Fonte: Autora (2021).

Conforme a NBR 7214/2015, a areia utilizada possui material retido na peneira de 0,6 mm, com isso, o agregado miúdo utilizado para a produção dos corpos de prova é considerado como areia média grossa.

3.1.4 Hidróxido de sódio (NaOH) e Silicato de Sódio (Na₂SiO₃)

Para a ativação da reação, foi utilizada uma solução 10 M de hidróxido de sódio e silicato de sódio com 98% de pureza (Figura 12). Os dois materiais são fabricados pela empresa Buschle & Lepper S/A. As especificações técnicas são apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3- Características do hidróxido de sódio.

Determinação	Especificação
Concentração (NaOH) (%)	97,0 – 100,0
Carbonatos (Na ₂ CO ₃) (%)	Máx. 0,60
Cloretos (NaCl) (%)	Máx. 0,03
Ferro (Fe) (ppm)	Máx. 6,0
Densidade (g/cm ³)	2,13 – 2,20
Aspecto visual	Escamas

Fonte: Buschle & Lepper S/A (2016).

Tabela 4- Composição química do silicato de sódio.

Composição Química			
Óxidos	Na ₂ O (%)	SiO ₂ (%)	H ₂ O (%)
Silicato	14,5 – 15,5	30,5 – 34,0	51,5 – 54,0

Fonte: Buschle & Lepper S/A (2016).

Figura 12- Matérias primas utilizadas para a preparação da solução: a) Hidróxido de Sódio (10M) e b) Silicato de sódio.

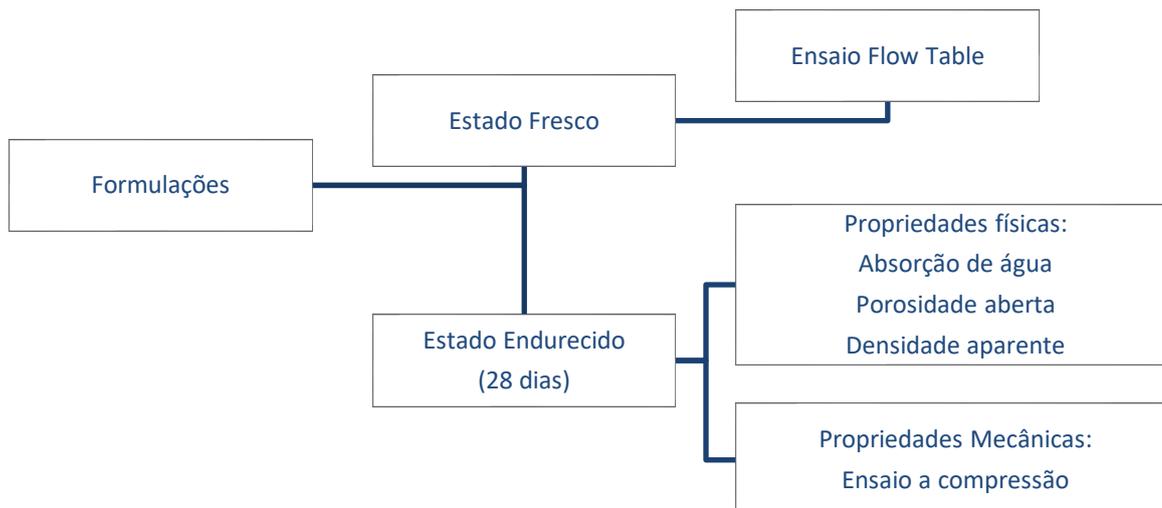


Fonte: Autora (2021).

3.2 METODOLOGIA ADOTADA

De modo a avaliar a influência da cinza de casca de arroz em argamassas geopoliméricas, foram produzidos corpos de prova variando a porcentagem de substituição, em relação à massa de metacaulim e posteriormente de silicato de sódio, em 10% e 20%. Além de avaliar a influência da cinza quando esta, substituída nas porcentagens de 5% e 10% por metacaulim e silicato de sódio simultaneamente. Para começar, foram definidas as formulações para cada porcentagem de matéria prima a ser substituída, a fim de encontrar uma relação Ligante/Areia adequada para a dosagem escolhida, garantindo uma boa trabalhabilidade. Posteriormente, foram produzidos os corpos de prova para a realização dos ensaios. A Figura 13 estrutura a sequência das atividades.

Figura 13- Metodologia Experimental utilizada.



Fonte: Autora (2021).

3.2.1 Formulações das argamassas geopoliméricas

Seguindo um planejamento, foram desenvolvidas sete formulações de argamassas geopoliméricas. De acordo com a metodologia utilizada em estudos prévios, foi determinada a relação Ligante/Areia como 1:0,5 (massa) e as porcentagens em massa de NaOH e Na₂SiO₃ como 13% e 35%. Vale ressaltar que a água presente na mistura é apenas a da solução 10 Molar de NaOH.

Com as porcentagens definidas, foram realizados ensaios na mesa de consistência, flow table, no estado fresco, e posteriormente foram produzidos os corpos de prova para serem analisados aos 28 dias de cura. As amostras inicialmente testadas foram de 20% de substituição de Na₂SiO₃, por apresentarem um comportamento viscoso mais crítico em relação as demais, impactando na trabalhabilidade da mistura. O ensaio na mesa de consistência foi realizado para validar e verificar a abertura das argamassas, como representado na Figura 14.

Figura 14- Diâmetro de espalhamento da argamassa geopolimérica de 20% de substituição de SN.



Fonte: Autora (2021).

Com isso, as demais formulações das argamassas foram desenvolvidas, variando a porcentagem de substituição de metacaulim em um primeiro momento e, posteriormente, variando o silicato de sódio. Por fim, os dois materiais foram substituídos simultaneamente em porcentagens pré-determinadas conforme a Tabela 5.

Tabela 5- Formulações utilizadas na produção das misturas geopoliméricas.

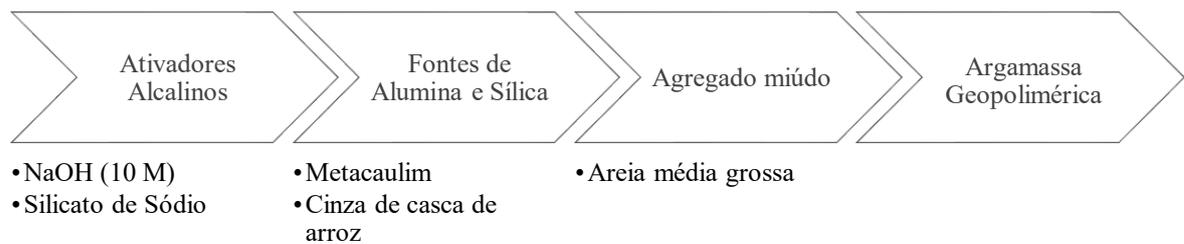
Formulações	Matérias Primas (%) em massa				
	CCA	MK	NaOH	Na ₂ SiO ₃	Areia
REF	0,0	52	13	35	100
10 MK	5,2	46,8	13	35	100
20 MK	10,4	41,6	13	35	100
10 SN	3,5	52	13	31,5	100
20 SN	7	52	13	28	100
5 MK/ SN	4,35	49,4	13	33,25	100
10 MK/ SN	8,7	46,8	13	31,5	100

Fonte: Autora (2021).

O procedimento que foi utilizado para as formulações vai de acordo com o esquema representado na Figura 15. Primeiramente, a solução ativadora foi preparada, misturando o NaOH (10 M) e o silicato de sódio no misturador mecânico por 5 minutos. Ao final desse período, foi adicionado o MK e a CCA e misturados, em velocidade 2 do misturador mecânico por 10 minutos. Durante 1 minuto a mistura foi feita manualmente para a retirada de material nas laterais. Em seguida, a areia foi adicionada e a mistura foi agitada por mais 2 minutos no

misturador mecânico. Com as misturas já prontas, os corpos de prova foram moldados conforme a NBR 13276/2005, nivelados com uma espátula para que obtivessem o tamanho adequado e, por fim, deixados à temperatura de 25° C por 24 h. Depois deste período, os corpos de prova foram desmoldados e colocados em uma sala para curar à temperatura ambiente por 28 dias. Os equipamentos utilizados para a produção das argamassas estão apresentados na Figura 16, e os corpos de provas já desmoldados na Figura 17.

Figura 15- Procedimento para preparação das argamassas geopoliméricas.



Fonte: Autora (2021).

Figura 16- Equipamentos utilizados para a produção das argamassas: a) Misturador mecânico; b) balança de precisão 0,01g ; c) moldes.

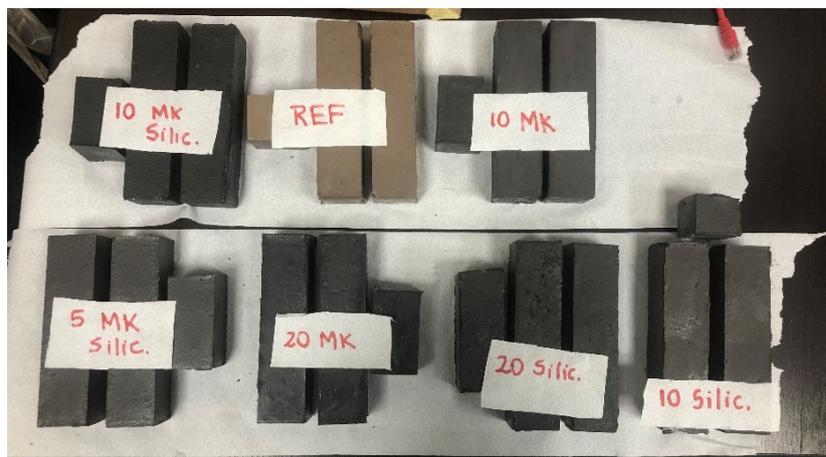




c)

Fonte: Autora (2021).

Figura 17- Corpos de prova em processo de cura a temperatura ambiente.



Fonte: Autora (2021).

3.2.2 Ensaios realizados nas argamassas no estado fresco

A fim de avaliar a consistência e a plasticidade logo após a produção foi realizado o ensaio flow table (Figura 18), especificado pelas normas NBR7215/2019 e NBR13276/2016. Esse ensaio foi utilizado neste trabalho de modo a limitar a quantidade de resíduo inserido na

argamassa até atingir quantidades aceitáveis de trabalhabilidade e um intervalo ideal de aberturas.

De acordo com a norma, o ensaio deve ser realizado logo após a preparação da mistura. Seguindo uma indicação, o molde foi preenchido em três etapas de massa igual e para adensar a mistura foi utilizado um soquete metálico em cada terço adicionado proferindo 5,10 e 15 golpes respectivamente. Após o preenchimento do molde foram desferidas 30 batidas no intervalo de 1 segundo cada golpe.

Figura 18- Ensaio de mesa de consistência (Flow Table) realizado no estado fresco.



Fonte: Schwitzky Junior (2017).

3.2.3 Ensaios no estado endurecido

3.2.3.1 Ensaio de resistência à compressão

A resistência do concreto é uma das características mais valorizadas por engenheiros e projetistas. Para analisar e verificar as propriedades no estado endurecido foram produzidos corpos de prova com dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm. Os ensaios de resistência à compressão seguiram a NBR 5739/2018 e foram realizados na Perville Engenharia e Empreendimentos – Joinville (Figura 19) e os corpos de prova foram cortados com uma lixadeira em tamanhos de 4 cm x 4 cm x 4 cm para a execução deste ensaio.

Figura 19- Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autora (2021).

Os rompimentos dos corpos de prova foram realizados aos 28 dias de cura. Após a realização destes ensaios, as propriedades físicas das amostras também foram estudadas.

3.2.3.2 Propriedades físicas: absorção de água (%), densidade aparente (g/cm^3) e porosidade aberta (%)

Os ensaios das propriedades físicas, absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta, especificado pelas normas NBR13280/2005 e NBR 9778/2005, foram realizados aos 28 dias de cura. O método utilizado segue o princípio de Arquimedes (Figura 20) e para isso, as amostras, já fracionadas em menores partes com auxílio de uma lixadeira, foram secas por 24 horas em estufa (100 ± 1) °C (Figura 20) e posteriormente pesadas, obtendo-se a massa seca em estufa (M_s). Após a secagem, os corpos de provas foram imersos em água e deixados por 72 horas para a absorção, garantindo a saturação das amostras. Passado esse período, foram pesados os fragmentos dos corpos de provas imersos em água obtendo o valor da massa imersa em água (M_i) e em seguida as superfícies das amostras foram secas e pesadas novamente para obtenção da massa saturada com superfície seca (M_{sss}). Com o objetivo de alcançar um valor com maior confiabilidade, foi realizado uma média com 3 valores de cada formulação, reduzindo assim, possíveis erros.

A partir dessas massas, as equações 1, 2 e 3 foram utilizadas, e obtidas a absorção de água, a densidade aparente e a porosidade aberta das formulações em estudo.

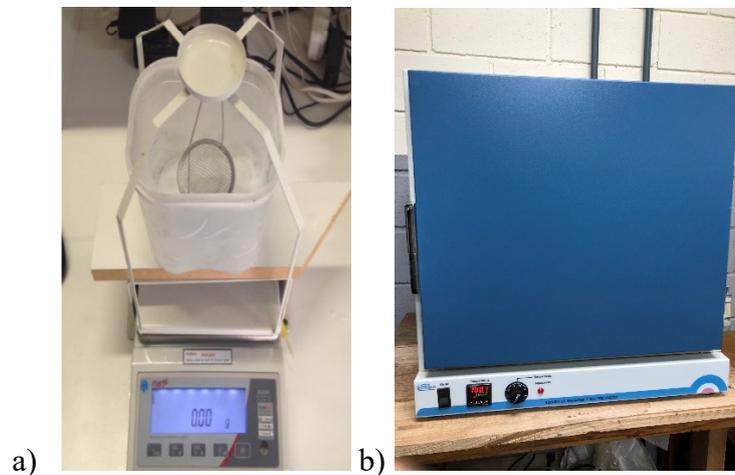
$$\text{Absorção de água} = \frac{m_{ss} - m_s}{m_s} * 100 \quad \text{Eq. 2}$$

$$\text{Densidade Aparente} = \frac{m_s}{m_{ss} - m_i} \quad \text{Eq. 3}$$

$$\text{Porosidade Aberta} = \frac{m_{ss} - m_s}{m_{ss} - m_i} * 100 \quad \text{Eq. 4}$$

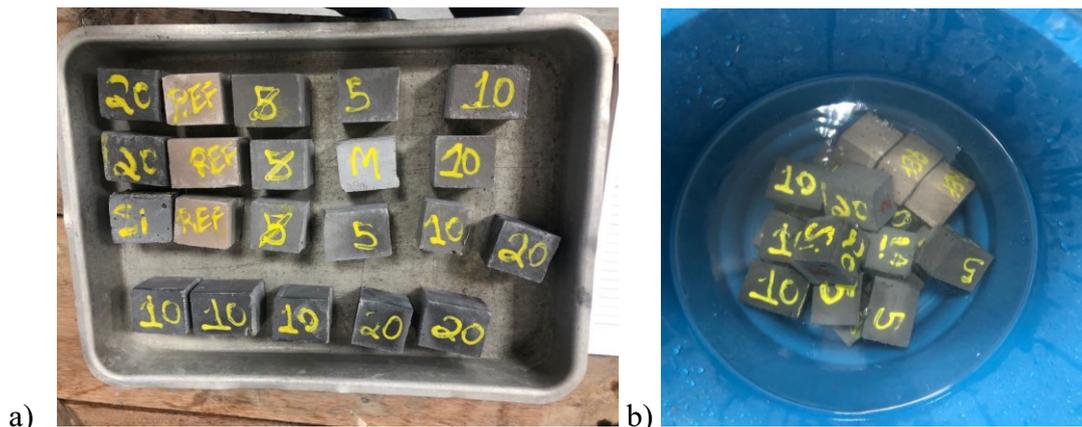
Em que: Ms = massa seca, Mi = massa imersa e Mss = massa saturada com superfície seca.

Figura 20- Equipamentos para propriedades físicas: estado endurecido. a) Ensaio de Arquimedes, b) Estufa.



Fonte: Schwitzky Junior (2017).

Figura 21- Corpos de prova: (a) após secagem na estufa e b) imersos em água.



Fonte: Autora (2021).

4. 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

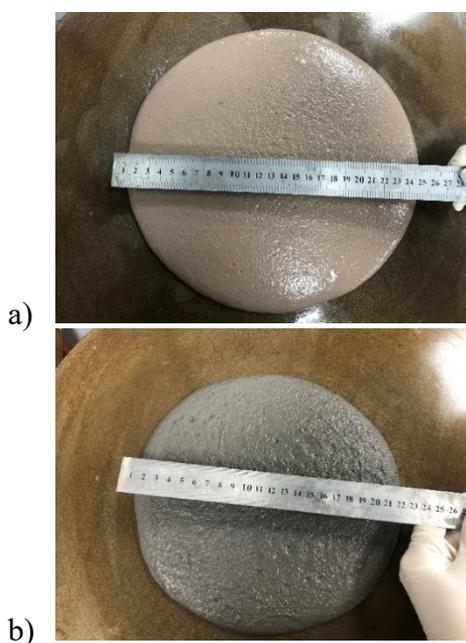
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos e discussões referentes a todos os ensaios realizados.

4.1 RESULTADO DA MESA DE CONSISTÊNCIA (FLOW TABLE)

Na Figura 22 observa-se que a substituição parcial do MK e SN por CCA resultou em uma diminuição significativa na trabalhabilidade da amostra, resultando em uma diferença de abertura de 240 mm (REF) para 180 mm (20SN). Este resultado justificado devido a quantidade de metacaulim e areia permanecerem constantes e a cinza de casca de arroz estar 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).

Importante observar que na substituição de 10MK a abertura de mesa foi maior em relação ao SN, representando maior trabalhabilidade, semelhante a REF. As diferenças na abertura na mesa de consistência (flow table) são apresentadas na Figura 22.

Figura 22- Valores dos espalhamentos das argamassas na mesa de consistência: a) REF b)10 MK c) 20 SN.





c)

Fonte: Autora (2021).

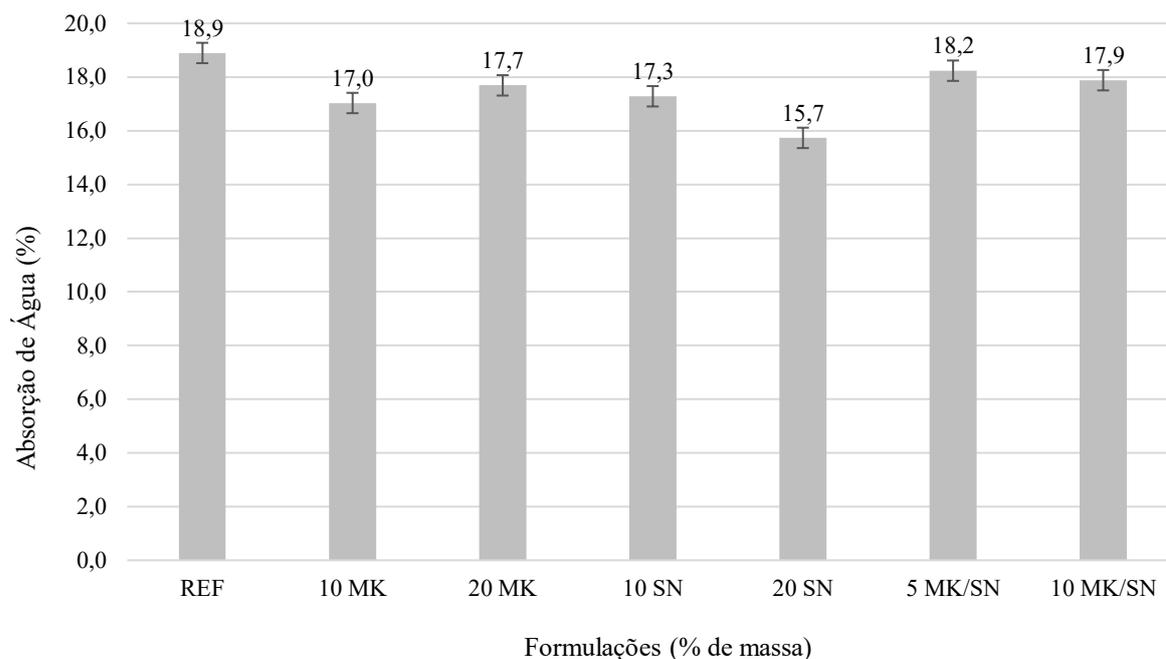
4.2 RESULTADOS NO ESTADO ENDURECIDO

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

Os resultados de absorção de água nas argamassas geopoliméricas (Gráfico 1) não apresentaram uma grande variação se comparados a REF. Entretanto, nota-se que em todas as formulações a absorção de água decresceu, destacando a mistura de 20SN, que apresentou uma redução de 17% em relação a amostra de referência.

À medida que ocorre a presença maior de sólidos em relação ao líquido (20SN), 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 (NOVAIS et al., 2019).

Gráfico 1- Absorção de água das argamassas geopoliméricas com 28 dias de cura.

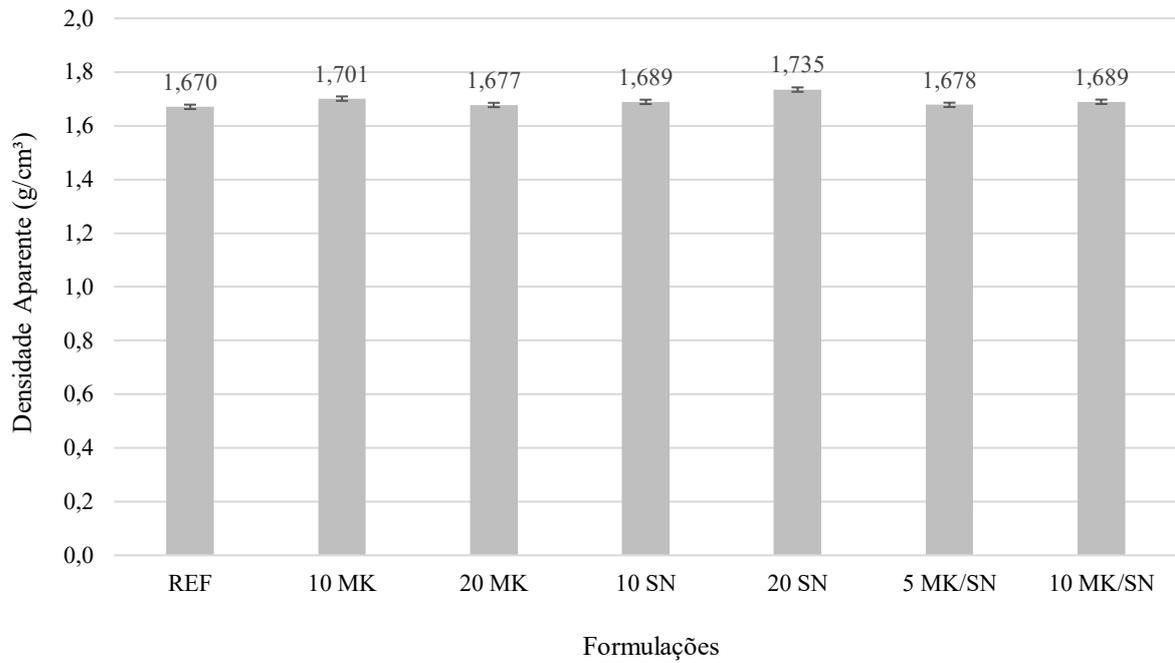


Fonte: Autora (2021).

Os valores de densidade aparente (Gráfico 2) apresentaram um comportamento inverso à absorção de água, sendo que todas as formulações foram superiores a REF. O Gráfico 3 apresenta a correlação entre a absorção de água e a densidade aparente. Essa correlação pode ser adequadamente descrita por uma equação de primeiro grau, indicando uma variação maior na mistura de 20SN, mas apresentando uma tendência nas demais formulações.

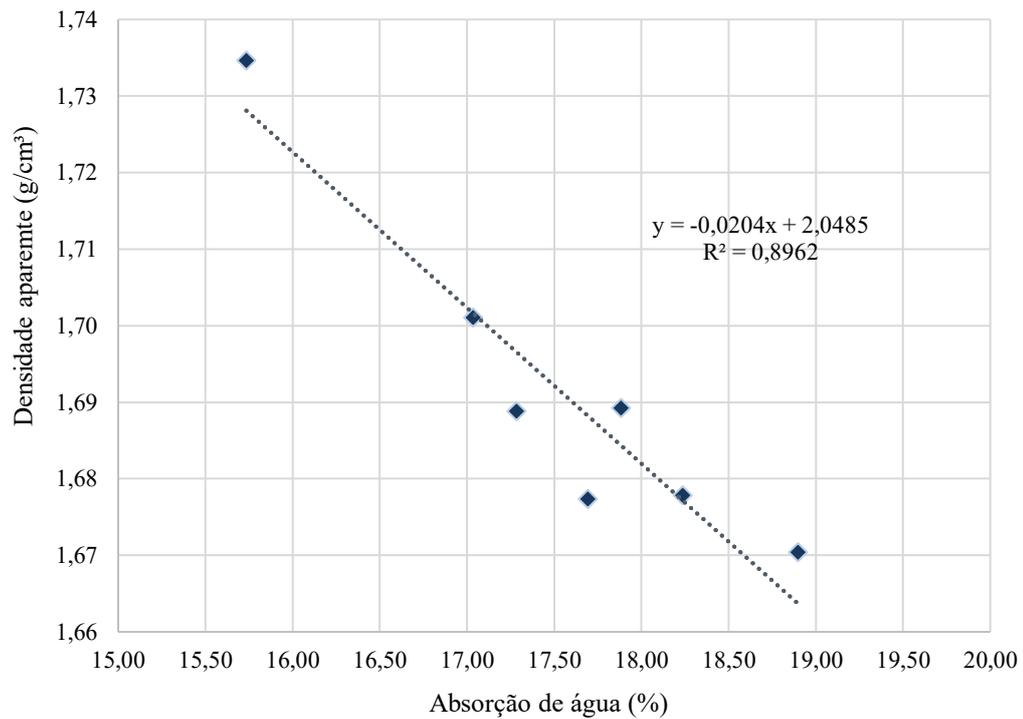
A densidade aparente na formulação de 20SN apresentou a maior densidade do experimento, isso pode ter sido provocado pelo refinamento no tamanho dos poros, dada pela retirada de silicato de sódio da mistura.

Gráfico 2- Densidade aparente das argamassas geopoliméricas com 28 dias de cura.



Fonte: Autora (2021).

Gráfico 3- Relação entre densidade aparente e absorção de água das amostras aos 28 dias de cura.

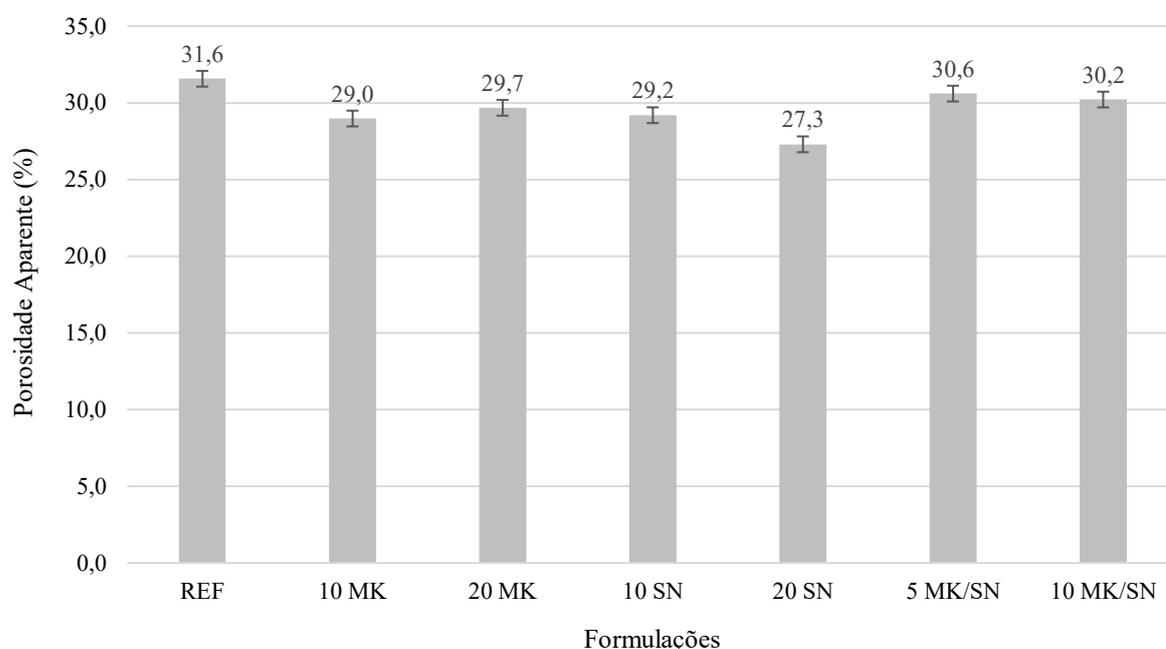


Fonte: Autora (2021).

Seguindo a mesma tendência da propriedade anterior, a porosidade aparente apresentou resultados inferiores a REF e inversamente proporcionais a densidade aparente. De acordo com o que já foi dito, possivelmente a formulação 20SN obteve uma alteração da arquitetura interna dos poros das amostras, dificultando assim a entrada de água no sistema e reduzindo, de acordo com o Gráfico 4, a porosidade em 14% da REF.

Percebe-se ainda, que a medida que o MK é substituído ocorre uma aproximação ao resultado da porosidade aparente da REF, de modo que ao aumentar a quantidade de água no sistema ocorre um aumento dos poros, observando uma redução de até 9% no 10MK.

Gráfico 4- Porosidade aparente das argamassas geopoliméricas aos 28 dias de cura.



Fonte: Autora (2021).

4.2.2 Resistência à Compressão

Em relação a resistência à compressão, a amostra REF apresentou uma resistência de 39,08 MPa aos 28 dias, enquanto a maioria das formulações apresentaram resultados superiores a ela, o que de acordo com Apolonio (2017), se dá pela reatividade pozolânica da CCA.

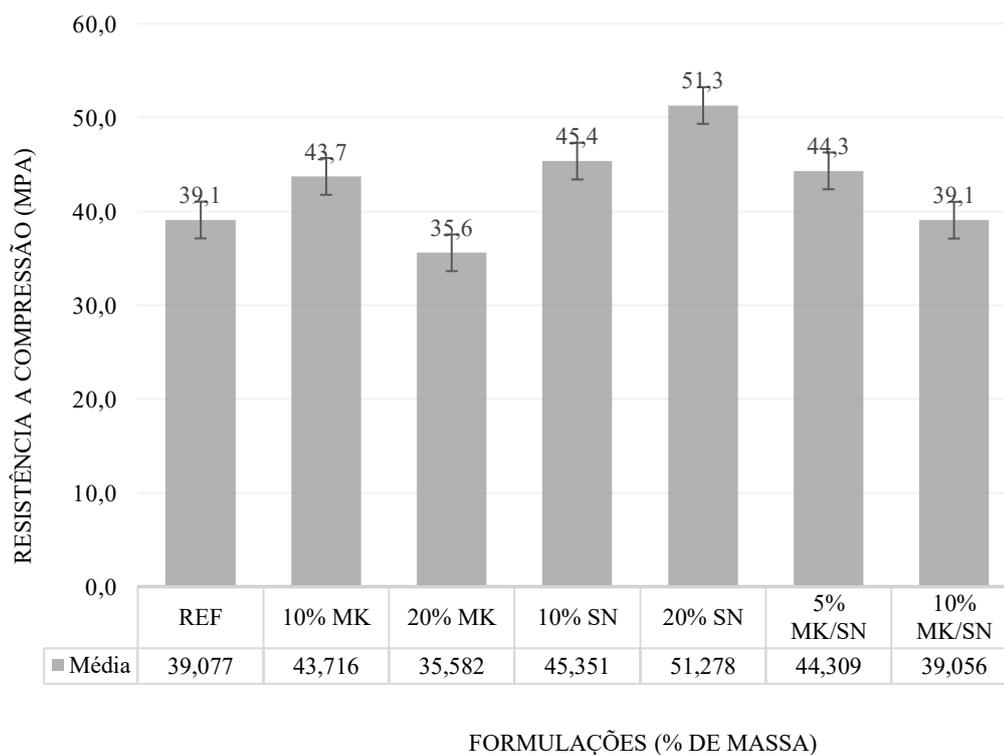
A resistência à compressão pode ser relacionada diretamente ao grau de polimerização atingido na mistura, garantindo maior resistência mecânica conforme for mais polimerizada a estrutura, além da relação S/L, que é afetada dependendo da quantidade de água no sistema em relação a quantidade de sólido.

Com base nos resultados apresentados e utilizando como comparativo a REF, verifica-se que a formulação com substituição de MK por CCA sofreu um aumento de resistência de até 12% na 10MK, isso em um primeiro momento possivelmente devido a adição de sílica altamente reativa no sistema. Porém, a medida que a porcentagem de substituição de MK aumenta, a resistência mecânica reduz, provavelmente em razão da diminuição do teor de alumina no sistema (AZEVEDO; STRECKER; LOMBARDI, 2018).

Em contrapartida, devido ao aumento de sílica no processo, as formulações de substituição de SN por CCA obtiveram as resistências mais elevadas, atingindo a maior resistência mecânica do experimento, de 31% acima da REF.

Um fator importante a considerar é que para as formulações com substituição de 5% e 10% de MK e SN simultâneos, há uma estimativa dos efeitos, o que leva a conclusão de que, possivelmente a falta de alumina no sistema tem maior importância que a inclusão de sílica, justificado pela resistência de 10 MK/SN de 39,06 MPa.

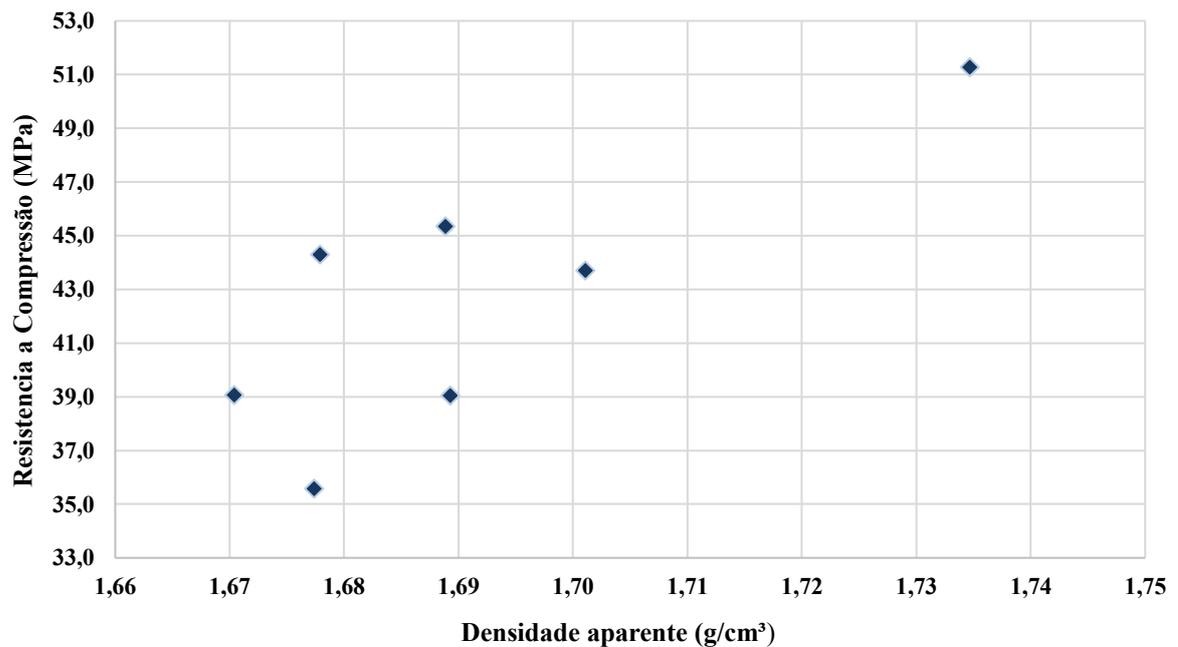
Gráfico 5- Resistência à compressão das argamassas geopoliméricas aos 28 dias.



Fonte: Autora (2021).

Os resultados obtidos de resistência à compressão estão relacionados com a densidade aparente (Gráfico 6). A partir da análise do Gráfico 6, observa-se que a amostra que apresentou maior densidade aparente também obteve maior resistência a compressão, representando uma proporcionalidade. Importante destacar que devido ao ajuste não apresentar um valor de R^2 alto, não foi adotado um modelo matemático que representasse essa relação.

Gráfico 6- Relação entre resistência à compressão e densidade aparente das argamassas geopoliméricas aos 28 dias de cura.



Fonte: Autora (2021).

5. 5. CONCLUSÃO

No estado fresco, por meio do ensaio na mesa de consistência (flow table) e das amostras testadas REF, 10MK e 20SN, foi possível observar que a presença da CCA na mistura reduziu a trabalhabilidade, tornando-a mais viscosa. A argamassa com 20SN apresentou a menor abertura devido a maior presença de partículas sólidas na mistura, deixando-as mais próximas e com isso, elevando o atrito superficial.

Com base nas propriedades físicas e comparando a REF com os resultados das misturas, a absorção de água reduziu até 16% na substituição de silicato de sódio por CCA, acompanhada da porosidade que reduziu cerca de 13% na mesma formulação, podendo ser justificada pela maior presença de sólidos em relação a líquido, tornando a mistura mais compacta e dificultando assim a entrada de água no sistema. Nas demais misturas a variação se mostrou pequena, atingindo valores próximos ao da argamassa de REF. Quanto a densidade aparente, mostrou-se inversa às demais propriedades físicas, observando um aumento de aproximadamente 4% em relação a REF.

Os parâmetros de resistência à compressão apresentaram em sua maioria um aumento em relação a formulação REF, podendo ser explicada possivelmente pelo aumento da relação Si/Al na mistura e menor porosidade aparente. As formulações de substituição do silicato de sódio por CCA foram as que alcançaram os maiores resultados, atingindo na substituição de 20% um aumento de até 30% na resistência mecânica. Apesar do resultado da resistência ter sido alto, trouxe prejuízo em termos de trabalhabilidade das amostras.

Embora a argamassa com 20 MK tenha atingido resistência inferior a REF, conclui-se que o resíduo, cinza de casca de arroz, pode ser utilizado em argamassas geopoliméricas, tanto na substituição de metacaulim, como na substituição de silicato de sódio, e/ou de ambos os materiais, de forma parcial, atingindo uma média entre as amostras de 42,64 MPa de resistência a compressão. Com a utilização de elementos com fontes alcalinas alternativas como de sílica complementar, a produção dessas argamassas geopoliméricas resulta em redução de custo e em um menor impacto ambiental, representando uma boa perspectiva de inovação e sustentabilidade.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar diferentes concentrações molares de NaOH nas formulações propostas, variando a porcentagem de CCA adicionada;
- Realizar testes de durabilidades nas argamassas geopoliméricas sugeridas;
- Analisar o comportamento reológico das misturas propostas.
- Desenvolver argamassas geopoliméricas substituindo proporcionalmente o teor de sílica.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2018.

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 12653: Materiais pozolânicos - requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.

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 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 15894: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta: Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2010.

APOLONIO, P. H. **Produção de geopolímeros usando cinza de casca de arroz como fonte complementar de sílica**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Curso de M Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.

AVILA, T. C. **Estudo da utilização da mistura de cinza da casca de arroz com hidróxido de sódio na produção de argamassas ativadas alcalinamente**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Curso de mestre em Ciência e Engenharia de Materiais., Unesp – Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2018.

AZEVEDO, A. G. S.; STRECKER, K.; LOMBARDI, C. T. **Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha**. Cerâmica, São Paulo, jul./set. 2018.

BHARATH, R. R. **Rheology of geopolymer concrete**. Disponível em: . Acesso em: 02 agosto,2021.

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.
- BUSCHLE & LEPPER S/A. **Ficha técnica: silicato de sódio neutro Q-79.** Departamento de gestão de qualidade, 2014.
- CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Caracterização reológica de argamassas pelo método de Squeeze Flow.** Florianópolis, 2005.
- CESARI, V. F. **Influência do uso de aditivos dispersantes em pastas de geopolímero produzido com cinza volante e hidróxido de sódio.** 2015. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- 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. **Geopolymer cement: a review.** France: Géopolymère Institut, 2013.
- DAVIDOVITS, J. **Geopolymers: inorganic polymeric new materials.** Journal of thermal analysis, 1999. Reimpressão.
- DAVIDOVITS, J. **Properties of geopolymer cements.** Geopolymer Institute. Alkaline Cements and concretes, Kiev, Ukraine, 1994.
- DELLA, V. P.; KUHN, I.; HOTZA, D. **Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica.** Química nova, SciELO Brasil, 2001.
- EIFERT, E. D. C. **Secagem, armazenamento e beneficiamento.** In: IN: BARRIGOSI, JAF (ED.). RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS PARA A CULTURA DE ARROZ . Embrapa Arroz e Feijão-Artigo em anais de congresso (ALICE). [S.l.], 2009.
- FENG, D.; PROVIS, J. L.; VAN D., JANNIE, S. J. **Thermal Activation of Albite for the Synthesis of One-Part Mix Geopolymers.** Journal Am. Ceram. Soc., 2012.
- FIGUEIREDO, C.P.; SANTOS, F. B.; CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CACHIM, P.; VELOSA, A. **O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2014.
- HARDJITO, D; RANGAN, B. V. **Development and properties of low-calcium fly ashbased geopolymer concrete. Research Report – Curtin University o Technology.** Perth. 2005.
- HWANG, C. L.; HUYNH, T. P. **Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolymers.** Construction and Building Materials 101, 2015.
- KOMNITSAS K., ZAHARAKI, D. **Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry.** Minerals Engineering, 2007.

- LEITE, B. M. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- 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.
- LIVI, C.N; REPETTE, W. L. **Ligante geopolimérico produzido com cinza volante e hidróxido de sódio.** Ambiente Construído. 2015.
- LOBO, B. S. **A influência da substituição parcial do metacaulim por cinza de casca de arroz em argamassas geopoliméricas.** 2017. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.
- 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.
- MING, L. et al. **Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A Review.** Progress in Materials Science 83, 2016.595–629
- MONTE, M. B. M; PAIVA, P. R. P; TRIGUEIRO, F. E. **Técnicas Alternativa para Modificação do Caulim. Rio de Janeiro: Cento de Tecnologia Mineral (CETEM), Série Rochas e Minerais Industriais,** 2003.
- NOVAIS, Rui 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.
- NUERNBERG, N. B. S. **Desenvolvimento e caracterização de geopolímeros a partir da cinza de casca de arroz e do lodo de anodização de alumínio.** 2018. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais., Universidade do Extremo Sul Catarinense – Unesc, Criciúma, 2018
- OLIVIA, M.; SARKER, P.; NIKRAZ, H.. **Water Penetrability of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete.** Conference on Constitution and Building Technol International, 2008.
- 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.
- PINTO, A. T. **Introdução ao estudo dos geopolímeros.** Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2006.
- PLASTICS TODAY. **Spray-applied geopolymer liner used in large diameter sewer pipe repair technology.** 2014. Disponível em: <https://www.plasticstoday.com/spray-applied->

geopolymer-liner-used-large-diameter-sewer-pipe-repair-technology. Acesso em: 10 ago. 2021.

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.

REIS, J.F. **Determinação de parâmetros de concreto através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado: Estudo de caso**. 2008. Ilha Solteira: UNESP.

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.

SENF L.; LABRINCHA A.; FERREIRA V.; HOTZA D.; REPETTE W. **Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars**. Construction and Building Materials, 2009.

SILROZ. Disponível em: <http://www.silroz.com/>. Acesso em: 08 ago. 2021.

SILVA, S. P. da. **Caulim**. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, 2001.

SILVA, E. **Contribuição para utilização de cinza de casca de arroz na construção civil**. 2009. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista.

SCHWITZKY JUNIOR, V. **Desenvolvimento de argamassas geopoliméricas a partir do uso de pó de lâmpada fluorescente e pó de alumínio**. 2017. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

TANNER, R. I. **Engineering rheology**. Rev.ed. New York: Oxford Science Publications, 1998.

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.

THE GEOPOLYMER INSTITUTE. **70,000 tonnes Geopolymer Concrete for airport**. Disponível em: <https://www.geopolymer.org/news/70000-tonnes-geopolymer-concrete-airport/>. Acesso em: 08 ago. 2021.

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.

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

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.