

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

BEATRIZ STEIN LOBO

**A INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO METACALUM POR CINZA
DE CASCA DE ARROZ EM ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS**

Joinville
2017

BEATRIZ STEIN LOBO

**A INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO METACALIM POR CINZA
DE CASCA DE ARROZ EM ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS**

Trabalho Conclusão de Curso apresentado ao Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Infraestrutura

Orientador: Prof. Dr. Luciano Senff

Joinville

2017

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que este momento acontecesse, me dando saúde e coragem durante toda esta caminhada.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que realizam seu trabalho com tanta dedicação, trabalhando arduamente para que nós, alunos, possamos contar com um ensino de extrema qualidade.

Ao Prof. Dr. Luciano Senff pela oportunidade e suporte na elaboração deste trabalho.

Aos colegas do Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável por toda ajuda e atenção.

Aos meus pais, Vera Lucia e Udilberto, pelo amor incondicional, pela determinação e luta na minha formação e do meu irmão.

Ao meu irmão, Vinicius, que mesmo à distância foi capaz de me incentivar e me estimular a enfrentar os desafios.

A Charlotte, Tobias e Emily pelas mais sinceras demonstrações de carinho e amor.

Ao Marco Aurélio Coppini e sua família pelo companheirismo, paciência, força e amizade fundamentais para realização deste trabalho.

As minhas amigas, companheiras de vida, Thais Minosso, Thais Stutz, Juliana Horst, Kahena Nantes, Ingrid Eyng Thiel, Paola da Luz Bayne e Angela Eyng, pela demonstração de força e caráter, e por estarem sempre ao meu lado, apesar da distância física.

As minhas amigas que tive a oportunidade de conhecer através da faculdade, Luana Anderloni Braz, Rafaela Moretto e Manuella de Paula, que fizeram a jornada acadêmica mais leve e divertida; espero que nossa amizade perdure por muito tempo.

RESUMO

Com quantidades cada vez maiores de resíduos e subprodutos industriais, a gestão desses tornou-se uma das principais preocupações ambientais no mundo. A utilização e reciclagem de subprodutos/resíduos constitui uma alternativa atrativa à eliminação para ultrapassar estes problemas de gestão de resíduos. A casca de arroz é um subproduto da indústria agrícola que é utilizada para geração de energia, o que dá origem à cinza de casca de arroz, um resíduo altamente poluente quando descartado no meio ambiente. Por outro lado, a indústria de cimento foi considerada uma indústria altamente intensiva em energia, agindo como uma enorme fonte de emissão de dióxido de carbono e levando a alguns perigos ambientais graves como o aquecimento global. Portanto, uma abordagem interessante é encontrar a melhor alternativa para argamassa de cimento Portland convencional que pode proporcionar propriedades de resistência e durabilidade comparáveis. Os ligantes geopoliméricos têm características semelhantes ou mesmo melhores. Este estudo tem como objetivo investigar a viabilidade de usar cinza de casca de arroz para substituir metacaulim em argamassas álcali-ativadas. As argamassas foram preparadas usando diferentes porcentagens de cinza de casca de arroz, entre 0 e 25%. Após 28 dias de cura, as amostras foram testadas quanto à resistência à flexão, à compressão e em relação às propriedades físicas. Os resultados mostram a formação de eflorescência e uma redução na resistência mecânica nas argamassas geopoliméricas com adição de 18,75% e 25% de cinza de casca de arroz.

Palavras-chave: Argamassa. Geopolímero. Cinza de Casca de Arroz.

ABSTRACT

With ever increasing quantities of industrial waste materials and by-products, waste management has become one of the major environmental concerns in the world. Utilization and recycling of by-products/waste is an attractive alternative to disposal in order to overcome these waste management issues. Rice husk is an agricultural industry by-product used to generate energy, which gives place to rice husk ash, a highly polluting waste when disposed in the environment. On the other hand, cement industry has been found to be a highly energy intensive industry acting as a huge source for carbon dioxide emission leading to some serious environmental hazards like global warming. Therefore, one interesting approach is to find the best alternative of the conventional Portland cement mortar which can provide comparable strength and durability properties. Geopolymeric binders have similar or even better characteristics. This study aims to investigate the feasibility of using rice husk ash to replace metakaolin in alkali-activated mortars. The mortars were prepared using different percentages of rice husk ash, between 0 and 25%. After 28 days of curing, the samples were tested for compressive and flexile strength and for physical properties. The results show efflorescence formation and that the mechanical resistance was reduced on geopolymer mortars with 18,75% and 25% of rice husk ash addition.

Keywords: Mortar. Geopolymer. Rice Husk Ash.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Quadro de aplicações de geopolímeros.....	15
Figura 2 – Instituto The Global Change, na universidade de Queensland, na Austrália.....	16
Figura 3 – Construção sustentável na universidade de Carolina do Norte, Estados Unidos....	16
Figura 4 – Restauração de tubos de bueiro em Detroit, com GeoSpray.....	17
Figura 5 – Distribuição granulométrica das partículas de metacaulim (CERMAT).....	24
Figura 6 – Difração de raios-x do metacaulim (CERMAT).....	24
Figura 7 – Distribuição granulométrica das partículas de CCA.....	24
Figura 8 – Difratoograma de sílica da cinza de casca de arroz.....	25
Figura 9 – Diâmetro do espalhamento da argamassa geopolimérica de referência na mesa de consistência.....	29
Figura 10 – Diâmetro de espalhamento da argamassa de referência.....	33
Figura 11 – Diâmetro de espalhamento da argamassa de com 25% de CCA.....	33
Figura 12 – Corpos de prova prismáticos com formulações de 0% a 25% de CCA.....	34
Figura 13 – Surgimento de eflorescência na superfície das argamassas geopoliméricas.....	35
Figura 14 – Resistência mecânica de argamassas geopoliméricas com 28 dias de cura.....	36
Figura 15 – Propriedades físicas das argamassas geopoliméricas.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química dos cimentos antigos	14
Tabela 2 – Resultados em % de óxidos, normalizados a 100%	23
Tabela 3 – Análise de tamanho de partículas	23
Tabela 4 – Composição química da CCA, em % de óxidos normalizados em 100%	25
Tabela 5 – Composição Química da Soda Cáustica	26
Tabela 6 – Composição química do silicato de sódio	27
Tabela 7 – Formulações das argamassas geopoliméricas com quantidades de matérias-primas em gramas.....	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

μm – Micrometro

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al_2O_3 – Óxido de alumínio

Ba – Bário

CaO – Óxido de cálcio

CCA – Cinza de Casca de Arroz

CICECO – Centro de Investigação em Materiais Cerâmicos e Compósitos

cm - Centímetro

CO_2 – Dióxido de Carbono

cP – Centipoise

Fe_2O_3 – Óxido férrico

g/cm^3 - Grama por centímetro cúbico

K_2O – Óxido de potássio

LabIConS – Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável

MgO – Óxido de mágnesio

mm – Milímetros

MnO – Óxido de manganês

Na_2CO_3 – Carbonato de Sódio

Na_2O – Óxido de sódio

Na_2SiO_3 – Silicato de Sódio

NaOH – Hidróxido de Sódio

P_2O_5 – Pentóxido de fósforo

SiO_2 – Dióxido de silício

S/L – Relação entre sólido e líquido

SO_3 – Trióxido de enxofre

TiO_2 – Dióxido de titânio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS.....	12
1.1.1	Objetivo Geral	12
1.1.2	Objetivos Específicos.....	12
2	GEOPOLÍMERO	13
2.1	HISTÓRIA	13
2.2	APLICAÇÕES	14
2.3	MATÉRIAS-PRIMAS	17
2.3.1	Fontes de Aluminossilicato	18
2.3.1.1	Metacaulim.....	18
2.3.1.2	Cinza de Casca de Arroz	19
2.3.2	Ativadores Alcalinos.....	19
2.4	PROPRIEDADES DO GEOPOLÍMERO.....	20
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1	MATERIAIS	22
3.1.1	Metacaulim.....	22
3.1.2	Cinza de Casca de Arroz.....	24
3.1.3	Hidróxido de Sódio.....	26
3.1.4	Silicato de Sódio.....	27
3.1.5	Areia	28
3.2	MÉTODOS.....	28
3.2.1	Definição das Formulações	29
3.2.2	Preparação da Argamassa e Moldagem dos Corpos de Prova	30
3.2.3	Ensaio no Estado Fresco.....	28

3.2.4	Ensaio no Estado Endurecido.....	31
3.2.4.1	Resistência à flexão e à compressão.....	31
3.2.4.2	Propriedades físicas.....	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1	MESA DE CONSISTÊNCIA.....	33
4.2	ANÁLISE MORFOLÓGICA.....	34
4.3	RESISTÊNCIA A FLEXÃO E COMPRESSÃO.....	35
4.4	PROPRIEDADES FÍSICAS: ABSORÇÃO DE ÁGUA, DENSIDADE APARENTE E POROSIDADE APARENTE.....	36
5	CONCLUSÃO	38
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado atualmente na área da construção civil, e seu uso global fica em segundo lugar, perdendo apenas para a água (DAVIDOVITS, 2013). Esse fato gera preocupação, uma vez que o principal componente utilizado para sua produção é o cimento Portland, cuja fabricação é altamente nociva à atmosfera.

A fabricação do cimento comum, denominado Portland, envolve a calcinação de carbonato de cálcio para produção de clínquer. Esse procedimento chega a gerar 0,95 toneladas de dióxido de carbono (CO₂) para 1 tonelada de cimento (DAVIDOVITS, 2013).

Os dados citados estimulam o estudo de novos materiais com natureza cimentícias para substituir parcialmente ou totalmente o consumo do cimento comum. Nesse sentido, atualmente há uma grande variedade de trabalhos na área de cimento geopolimérico, um ligante que utiliza materiais de natureza geológica que contenham alumina e sílica em sua composição e cuja produção é menos prejudicial ao meio ambiente.

Por outro lado, temos a casca de arroz que é um subproduto da indústria alimentícia e é utilizada para geração de energia. A queima direta desse resíduo gera a cinza de casca de arroz (CCA) que, caso não seja devidamente reaproveitada, é altamente poluente para o solo, uma vez que contém uma certa quantidade de carbono residual em sua composição. Por isso, é necessário verificar possibilidades de utilização para este resíduo, a fim de que suas propriedades sejam bem utilizadas (FOLETTTO et al., 2005; SILVA, 2006).

A CCA é utilizada há algum tempo em vários campos de aplicações, e uma delas é na área de construção civil, mais especificamente em concretos. Ela contém uma grande quantidade de sílica e é muito valiosa quando produzida em condições bem controladas (FOLETTTO et al., 2005).

Diante disso, esta pesquisa de cunho experimental consiste na produção de uma argamassa geopolimérica a partir do metacaulim e CCA, variando o último de 0% a 25%. O objetivo é avaliar a influência da CCA, mecânica e fisicamente, quando colocada no lugar do metacaulim. As formulações foram determinadas a partir da literatura e através de ensaios

utilizando a mesa de consistência (*flow table test*), e o material foi submetido a um ensaio de resistência após 28 dias de cura, a fim de avaliar seu comportamento mecânico.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma argamassa utilizando ligante geopolimérico a partir da substituição parcial, em diferentes porcentagens, do metacaulim pela cinza de casca de arroz como fonte de aluminossilicatos.

1.1.2 Objetivos Específicos

A fim de atingir o objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a influência de diferentes porcentagens de substituição do metacaulim por CCA através de ensaios no estado fresco e endurecido;
- Determinar a relação entre sólido e líquido (S/L) das amostras com base no diâmetro de espalhamento na mesa de consistência;
- Produzir corpos de prova em argamassa geopolimérica a fim de avaliar a resistência à tração na flexão e à compressão com 28 dias de cura;
- Realizar ensaios de propriedades físicas (absorção de água, densidade aparente e porosidade aparente) com 28 dias de cura através do Ensaio de Arquimedes.

2 GEOPOLÍMERO

Os geopolímeros são polímeros inorgânicos obtidos a partir da polimerização de matérias primas naturais de origem geológica, contendo aluminossilicatos (ORIGEM..., 2017). É de grande interesse para uso como material para construção em detrimento do cimento convencional utilizado atualmente, devido à sua característica cimentícia e algumas vantagens apresentadas pelo material (WEERDT, 2011).

Esta seção apresenta alguns tópicos relacionados ao geopolímero, tais como sua origem, seus componentes, algumas aplicações e vantagens em relação ao convencional cimento Portland.

2.1 HISTÓRIA

Joseph Davidovits criou uma empresa em 1972 e deu início às pesquisas relacionadas aos plásticos inorgânicos que não fossem inflamáveis ou combustíveis, objetivadas por uma série de incêndios ocorridos na França entre os anos de 1970 e 1973. Essas pesquisas resultaram na criação do que hoje denomina-se Geopolímero (DAVIDOVITS, 2002; GEOPOLÍMERO..., 2017).

Mesmo que os estudos relacionados ao tema tenham ganhado grande notoriedade com Davidovits, conhecidas obras da antiguidade, como o Coliseu em Roma, utilizaram materiais similares, ou seja, materiais pétreos artificialmente aglomerados que apresentam notável comportamento mecânico e durabilidade (COSTA, 2014; PINTO, 2006). A Tabela 1 mostra a composição química de cimentos encontrados em Roma, e pode-se verificar a existência de uma quantidade significativa de sílica e alumina (PINTO, 2006). Ademais, segundo a literatura, foi constatado que os blocos utilizados pelos egípcios não são de pedra natural, mas sim de um concreto que contém pedregulhos de calcário caulínico com hidróxido de sódio (NaOH), produzidos *in situ* misturando cal ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$), barrilha (Na_2CO_2) e água. Adicionalmente, pesquisadores europeus, como Glukhovsky, têm trabalho no desenvolvimento de cimentos alcalinos desde a década de 50. (ORIGEM..., 2017; CUNHA, 2014)

Tabela 1 – Composição química dos cimentos antigos

Composição Química	Cimentos Romanos	
	160 a.C.	140 a.C
SiO₂	42,00%	49,56%
Al₂O₃	14,48%	14,01%
Na₂O, K₂O	4,21%	4,02%
CaO, MgO	39,22%	42,35%

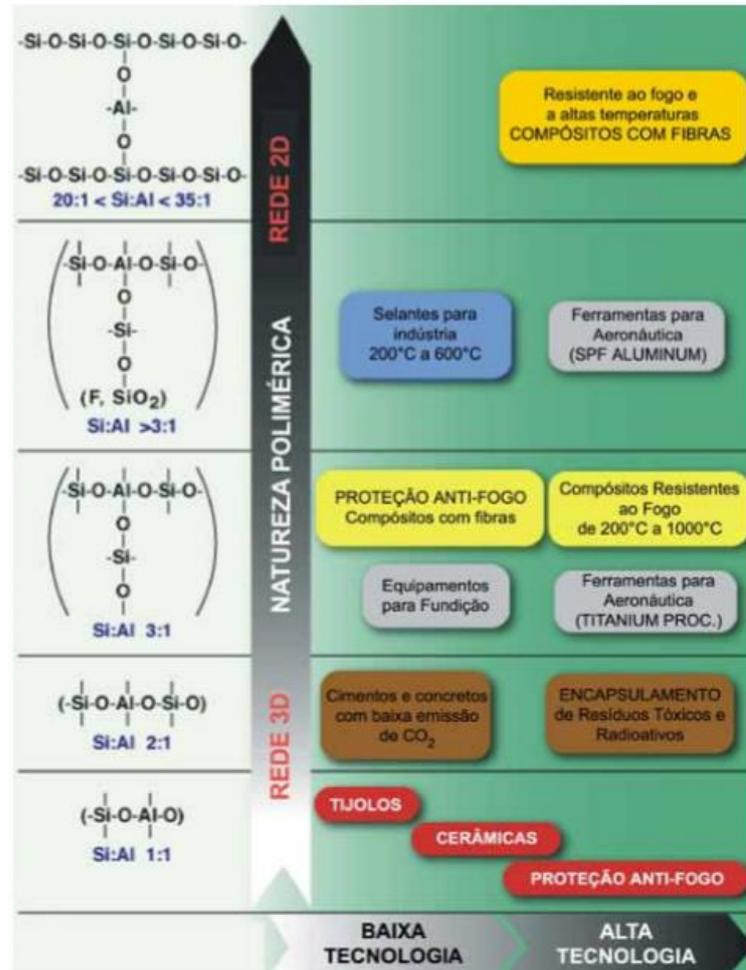
Fonte: (PINTO, 2006)

O prefixo *geo* está relacionado à geossíntese, processo químico que dá origem às rochas artificiais em temperaturas inferiores à 100°C (FROM..., 1996). Além disso, eles são inorgânicos, duros, estáveis em temperaturas superiores a 1250°C e não são inflamáveis. Ainda, são considerados polímeros porque são transformados, sofrem policondensação e endurecem rapidamente, em poucos minutos, em baixas temperaturas (DAVIDOVITS, 2002).

2.2 APLICAÇÕES

Davidovits resumiu em um quadro simplificado (Figura 1) as possíveis aplicações, tendo como referência as razões Si/Al, o campo de aplicação e o grau de intervenção tecnológica envolvido (DAVIDOVITS, 2002). O campo dos ligantes e materiais de construção contém baixas relações Si/Al, vez que isso favorece a obtenção de alta resistência mecânica. À medida que essa relação cresce – até 35 – obtém-se materiais com características poliméricas (PINTO, 2006).

Figura 1 – Quadro de aplicações de geopolímeros



Fonte: Davidovits (2002 adaptado por PINTO, 2006).

Uma aplicação na área de construção civil é utilizar o geopolímero como ligante geopolimérico. Os cimentos geopoliméricos apresentam características particulares que revelam um grande potencial de aplicações, em substituição ao cimento Portland. Apresentam alta resistência mecânica inicial, resistência ao gelo-degelo, excelente comportamento ao fogo e boa resistência contra agentes corrosivos, o que resulta em alta durabilidade (DAVIDOVITS, 2002; PINTO, 2006).

Tais propriedades resultam na utilização em reforço de estruturas, como pontes e edifícios; área de transportes e infraestrutura, onde uma alta resistência ao fogo é necessária; método de reparo para estruturas de concreto, tijolo e pedras; pistas de aeroportos; e encapsulamentos de resíduos tóxicos (DAVIDOVITS, 2002).

O instituto *The Global Change* (Figura 2), localizado na Universidade de Queensland, na Austrália, foi o primeiro empreendimento no mundo a utilizar o concreto geopolimérico

estruturalmente. Esse instituto é conhecido pelas suas características sustentáveis (HASSELL, 2017).

Figura 2 – Instituto *The Global Change*, na Universidade de Queensland, na Austrália



Fonte: HASSELL, 2017.

Além disso, outra construção utilizou o concreto geopolimérico com o intuito de obter uma casa sustentável. A Universidade da Carolina do Norte, em Charlotte, Estados Unidos, possui um projeto denominado *UrbanEden* (Figura 3) cujo objetivo é obter design e construção sustentáveis, e utilizou o concreto geopolimérico em suas paredes e chão (UNC CHARLOTTE, 2017)

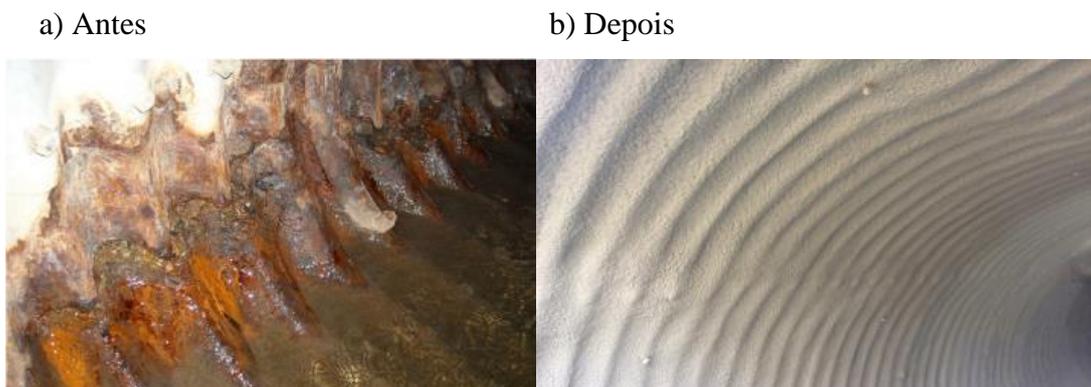
Figura 3 – Construção sustentável na Universidade de Carolina do Norte, Estados Unidos



Fonte: UNC CHARLOTTE, 2017.

Outras aplicações interessantes são realizadas pela empresa Milliken Infrastructure Solutions. Essa corporação oferece soluções para reparo e restauração de tubos e bueiros através da aplicação de argamassa geopolimérica com um produto denominado GeoSpray (Figura 4). Um benefício apresentado pela empresa é que o custo da obra diminui consideravelmente, uma vez que o processo é feito no local, sem necessidade de escavações e troca de tubulações (MILLIKEN, 2014b).

Figura 4 – Restauração de tubos de bueiro em Detroit, com GeoSpray



Fonte: MILLIKEN, 2016.

Outro produto que a empresa oferece é um concreto aerado geopolimérico, que pode ser utilizado para estabilização do solo para rodovias e rampas de pontes, controle de erosão, redução de carga sobre construções subterrâneas e prover absorção de choque em áreas de instabilidade sísmica (MILLIKEN, 2014a).

2.3 MATÉRIAS-PRIMAS

Geopolímeros são produzidos misturando alumina e sílica com uma solução ativadora alcalina. Para se obter um geopolímero de qualidade e com características desejáveis, deve-se ficar atento à algumas relações entre alguns componentes químicos presentes no processo. Essas relações determinam alguns fatores, como o grau de resistência à compressão ou retração que o geopolímero apresenta ao final do processo. Algumas razões importantes são: Si/Al, Na/Si, Na/Al, H₂O/Na e relação S/L (WEERDT, 2011).

Segundo Duxson et al. (2007), produtos geopoliméricos formados com relações Si/Al inferiores a 1 ou superiores a 5 seriam totalmente inapropriados para substituição do cimento, já que perdem resistência, apresentam baixa estabilidade térmica e têm a tendência a se

dissolverem em água por causa da alta relação entre Na/Al, o que indica grandes quantidades de cátions livres dentro da estrutura do geopolímero. Além disso, a relação Na/Al deveria ficar próxima a 1 para boas performances mecânicas e boa durabilidade.

Um outro estudo, apresentado por Diaz et al. (2012 apud Vassalo, 2013), mostra que as proporções molares têm um forte efeito sobre o desenvolvimento da resistência mecânica. As relações ideais que obtiveram melhores resultados foram $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2,96$ e $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,62$ e $0,93$.

Vale a pena ressaltar que os números indicados como referência na literatura podem variar, uma vez que às vezes é difícil saber qual parte do material é amorfa e reativa.

2.3.1 Fontes de Aluminossilicato

Minerais de aluminossilicato são compostos de alumínio, silício e oxigênio. Existe uma ampla variedade de materiais disponíveis na natureza e que podem ser fonte de aluminossilicato para produção de geopolímeros. Como exemplo tem-se: resíduos de diversas indústrias, pós aluminossilicato reativos naturais e aluminossilicato ativado (WEERDT, 2011). O importante é que o material deve conter alumina e sílica reativa em sua composição química.

2.3.1.1 Metacaulim

Os caulinos são argilas resultantes de alterações químicas das rochas (FROM..., 1996; PINTO, 2006). O termo caulim, do inglês “china clay”, tem origem na palavra chinesa Kauling que significa colina alta, e é referente à uma colina situada no norte da China onde o material é obtido. É um dos seis minerais mais abundante no topo da crosta terrestre (SILVA, 2001).

Formado principalmente pela caulinita, no caulim também podem ocorrer outros minerais do mesmo grupo, a citar: diquita, nacrita, folerita, anauxita, colirita e tuesita; ademais, apresenta em sua composição elementos como alumínio, silício, hidrogênio e oxigênio. Além disso, o material possui outras substâncias em forma de impurezas (SILVA, 2001).

As reservas de caulim são abundantes no mundo e o Brasil detém cerca de 28% do total mundial estimado (SILVA, 2001).

O metacaulim, que pode ser ativado alcalinamente, é obtido quando a argila é submetida a um tratamento térmico. A transformação do caulim em metacaulim torna o material muito mais reativo (PINTO, 2006).

Dependendo da composição química da argila de base, o metacaulim pode apresentar maior ou menor grau de finura e superfície específica, e sua coloração pode variar entre branca, creme ou levemente rosada (PINTO, 2006).

2.3.1.2 Cinza de Casca de Arroz

A indústria do arroz gera um grande volume de casca como subproduto, que são aproveitadas de diversas maneiras. Uma delas é a geração de energia através da queima da casca de arroz, que é uma prática bem vista, uma vez que é viável do ponto de vista tecnológico, econômico e ético. O resultado da combustão direta da casca é a cinza de casca de arroz (CCA) (FOLETTTO et al., 2005).

No entanto, a CCA é altamente poluente para o meio ambiente devido à presença de carbono residual em sua composição, que é prejudicial ao solo. Desse modo, é necessário reutilizar esse resíduo como forma de conservação ambiental (FOLETTTO et al, 2005).

A CCA possui um alto teor de sílica em sua composição, superior à 90%, o que agrega valor ao resíduo, juntamente com a alta superfície específica, tamanho e pureza da partícula. (FOLETTTO et al., 2005). A reatividade do material vai depender da formação de proporções relativas de sílica na forma cristalina e amorfa, em função de diferentes temperaturas durante o processo de queima. Quanto maior a quantidade de sílica amorfa presente, mais reativo é o resíduo (SILVA, 2006).

2.3.2 Ativadores Alcalinos

Um importante componente para o processo de obtenção do geopolímero são os ativadores que são compostos alcalinos ou alcalinos terrosos, como:

- Hidróxidos (ROH, R(OH)₂),
- Sais de ácidos fracos (R₂CO₃, R₂S, RF),
- Sais de ácidos fortes (Na₂SO₄, CaSO₄.2H₂O),
- Sais de sílica do tipo R₂.(n)SiO₂;

Onde R é um íon alcalino como K, Na e Li ou alcalino terroso como Ca (PINTO, 2006; PUERTAS, 1995).

Os ativadores mais efetivos são o hidróxido de sódio (NaOH), carbonato de sódio (Na₂CO₃) e o silicato de sódio (Na₂SiO₃), do ponto de vista mecânico. Ainda, se verificou que

as misturas de ativadores também possuem características benéficas para o desenvolvimento de resistência (PUERTAS, 1995).

2.4 PROPRIEDADES DO CIMENTO GEOPOLIMÉRICO

O concreto é o material mais utilizado na área de construção. Atualmente, grandes projetos de construção e infraestrutura requerem enormes quantidades de concreto e pasta de cimento Portland, que resulta em uma grande emissão de dióxido de carbono (CO₂) em sua fabricação (DAVIDOVITS, 2013).

O cimento Portland é um grande poluente atmosférico, além de ser uma indústria que consome muita energia para produção do Clínquer a aproximadamente 1450°C. É estimado que a produção de 1 tonelada de cimento produza aproximadamente 1 tonelada de CO₂ (CIMENTO..., 2017). Existe a possibilidade de utilizar outras matérias-primas em conjunto com cimento Portland, como cinzas volantes, que resultam em uma diminuição de 15% na emissão de CO₂ (DAVIDOVITS, 2013).

Acredita-se que esse número seja muito inferior quando se trata da produção de cimento geopolimérico, podendo chegar a ser 7 vezes menor (CIMENTO..., 2017). A redução pode variar de 43%, nos casos mais desfavoráveis, ou até 90%, em situações muito favoráveis (DAVIDOVITS, 2013).

Além da considerável vantagem em relação à conservação ambiental, o cimento geopolimérico possui um coeficiente de retração 4/5 inferior ao do cimento Portland; adquire cerca de 70% da resistência à compressão em 4 horas; consegue resistir a temperaturas de 1000°C a 1200°C sem perdas significativas nas características funcionais; e apresenta excelente durabilidade (CUNHA, 2013).

No entanto, a fim de se obter essas propriedades, o geopolímero requer uma mão-de-obra especializada. A reologia, ou seja, o comportamento da fluidez desse material, pode ser difícil e complexa de ser controlada, principalmente quando é utilizado sódio como fonte alcalina. Além disso, o sistema é sensível a quantidade de silicatos presente na mistura, o que é complicado quando se utilizam fontes de sílica proveniente de resíduos industriais (NEMATOLLAHI; SANJAYAN; SHAIKH, 2015).

Outro ponto muito importante é a quantidade de água presente, uma vez que ela está relacionada ao surgimento de eflorescência (NEMATOLLAHI; SANJAYAN; SHAIKH, 2015), o que não é benéfico quando o geopolímero é utilizado na área da construção civil. Esse fenômeno ocorre quando há íons alcalinos (Na⁺ e K⁺) presente em elevada quantidade,

geralmente quando se utiliza muito ativador, e pode gerar uma degradação progressiva do geopolímero. Todo o sódio ou potássio em excesso tende a migrar para superfície, onde se combina com o CO_2 atmosférico. É necessário se atentar às razões molares entre Al/Na e Al/K para que estas relações não sejam superiores a 1 (DIAS, 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentados os materiais, métodos e equipamentos utilizados para o desenvolvimento da argamassa geopolimérica. Foram desenvolvidas 5 diferentes formulações, variando a porcentagem de substituição do metacaulim por CCA de 0% a 25%. Todas as formulações foram produzidas utilizando o mesmo procedimento, que está descrito posteriormente.

Em um primeiro momento, foi definido a dosagem. Além disso, foram feitos alguns testes na mesa de consistência para verificação da relação sólido/líquido. Esses dados são comuns em todos os corpos de prova.

A produção das argamassas, os ensaios no estado fresco e os ensaios de propriedades físicas foram realizados no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável (LabIConS), pertencente à Universidade Federal de Santa Catarina, campus de Joinville. Os ensaios no estado endurecido para compressão foram executados nas dependências do Centro Universitário Católica de Santa Catarina, unidade de Joinville.

3.1 MATERIAIS

A argamassa analisada é composta de um material cimentício, areia e água. Neste trabalho, foi utilizado um ligante geopolimérico constituído por metacaulim como fonte de aluminossilicato e hidróxido de sódio misturado com silicato de sódio como ativadores. Como o objetivo é avaliar a influência da CCA na substituição do metacaulim, este material foi utilizado como uma variável, atuando também como fonte de aluminossilicatos.

3.1.1 Metacaulim

O metacaulim utilizado foi fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil, onde é comercializado com o nome de Metacaulim HP Ultra. Segundo o *website* da empresa (FICHA..., 2017), o produto está dentro dos limites especificados na norma NBR15894 (ABNT, 2010).

Foram realizados alguns ensaios de caracterização do material pelo Núcleo de Pesquisas CERMAT, em 2015. A composição química (Tabela 2) do material foi determinada por fluorescência de raio-X, a densidade real (Tabela 3) e a distribuição granulométrica (Figura 5) foram obtidas utilizando um picnômetro Ultrapycnometer 1200 P/N e foi utilizado difração de raio-X a fim de se identificar as fases presentes no material, que são: caulinita (K), quartzo (Q) e mica (L) (Figura 6). Segundo Cascaes (2016), a área específica do metacaulim é de 32700 m²/kg.

Tabela 2 – Resultados em % de óxidos do metacaulim, normalizados a 100%

Óxidos	Resultados
SiO₂	57,1
Al₂O₃	36,6
Fe₂O₃	2,3
CaO	0,1
MgO	0,6
Na₂O	<0,05
K₂O	2,1
P₂O₅	0,1
TiO₂	1,5

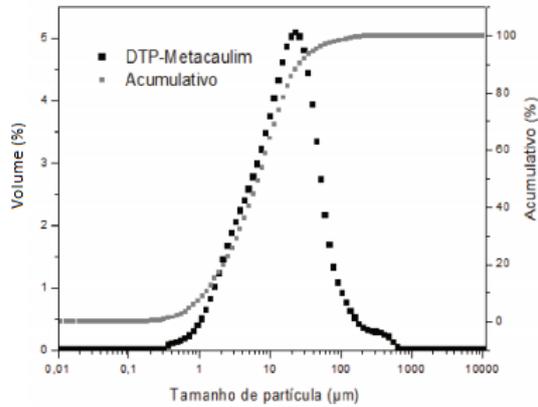
Fonte: MACCARINI, 2015 adaptado pelo Autor.

Tabela 3 – Análise de tamanho de partículas

Descrição	Resultados
Diâmetro Médio	21 µm
Densidade	3,17 g/cm ³

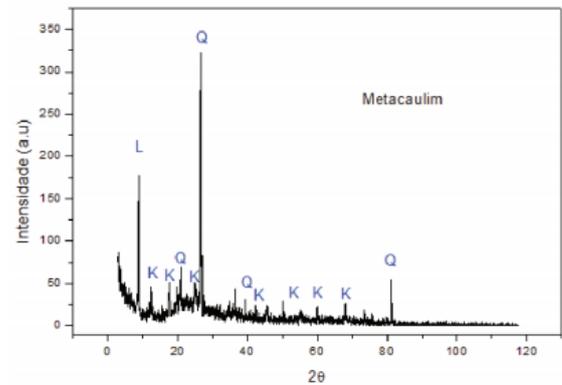
Fonte: MACCARINI, 2015 adaptado pelo Autor.

Figura 5 – Distribuição granulométrica das partículas de metacaulim (CERMAT)



Fonte: MACCARINI, 2015.

Figura 6 – Difração de raios-x do metacaulim (CERMAT)

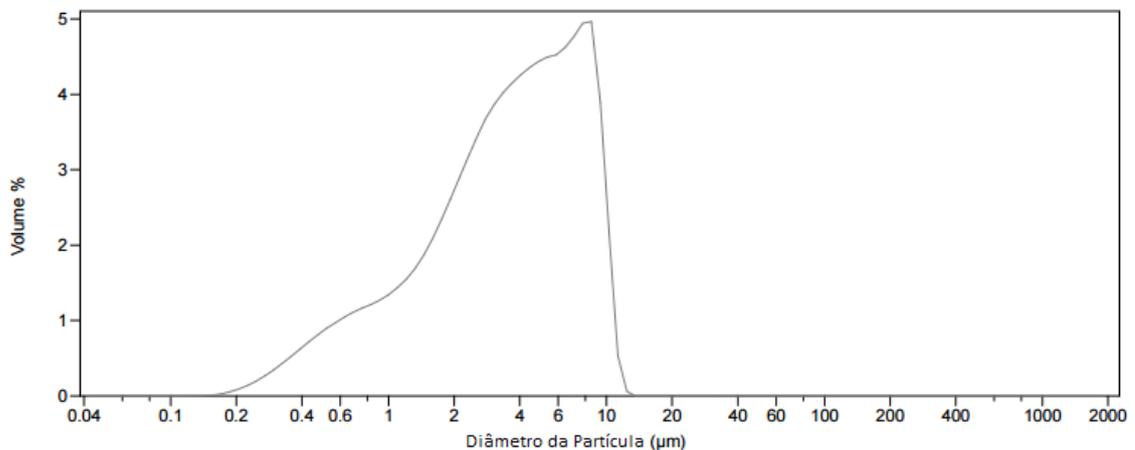


Fonte: MACCARINI, 2015.

3.1.2 Cinza de Casca de Arroz

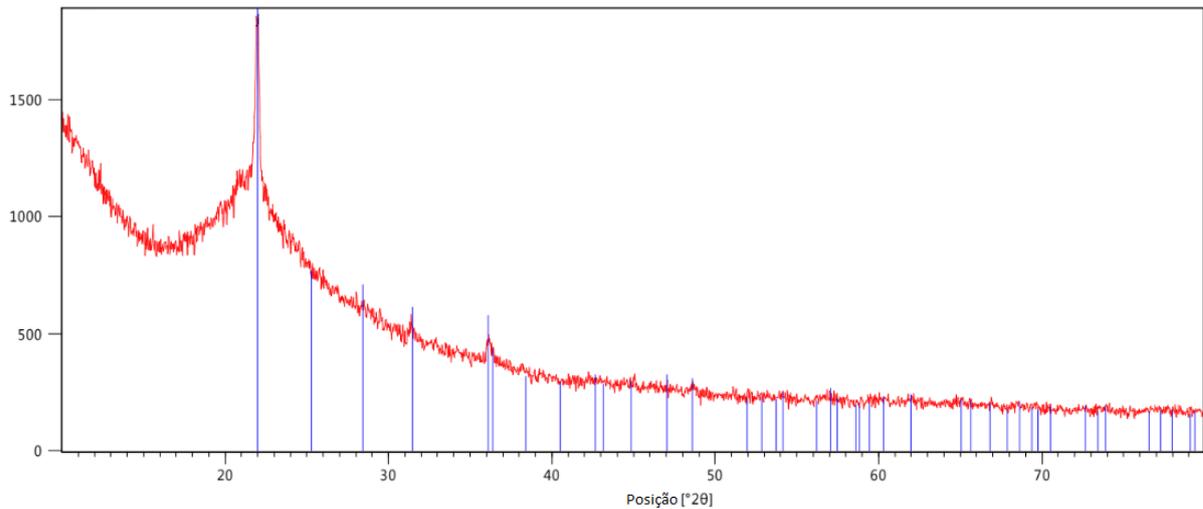
A usina termoelétrica Sílica Verde do Arroz (SVA), do grupo Pilecco Nobre, produz a sílica de casca de arroz (PILECCO NOBRE, 2017). A CCA utilizada neste trabalho é comercializada por essa empresa com o nome fantasia de Silcca Nobre. Sua caracterização foi realizada em Portugal, no Centro de Investigação de Materiais Cerâmicos e Compósitos (CICECO), através de análise granulométrica das partículas (Figura 7) e difração de raios-x (Figura 8). O tamanho médio das partículas apresentado é $4.208 \mu\text{m}$. Além disso, segundo Marangon et al. (2013), apresenta uma área específica de $21142 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Figura 7 – Distribuição granulométrica das partículas de CCA



Fonte: CICECO, 2017.

Figura 8 – Difratoograma de sílica da cinza de casca de arroz



Fonte: CICECO, 2017.

A partir dos gráficos e de acordo com Marangon et al. (2013), é possível concluir que a CCA possui uma estrutura altamente amorfa, mas apresenta também picos que indicam a presença de uma fase cristalina, o que significa que nem todo o material é reativo.

Ademais, a composição química da Silca Nobre é apresentada na Tabela 4. Vale a pena ressaltar que, segundo a NBR 12653 (2012) que rege a produção de materiais pozolânicos, a perda ao fogo é limitada a 6%. Dessa forma, observa-se que a CCA atende aos requisitos.

Tabela 4 – Composição química da CCA, em % 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.

Dessa forma, verifica-se que a CCA é uma importante fonte de sílica a ser adicionada à argamassa geopolimérica, podendo ser utilizada para balancear a razão Si/Al do material.

3.1.3 Hidróxido de Sódio

O hidróxido de sódio, também conhecido por soda cáustica, é um material sólido, reativo e corrosivo; portanto, deve ser manuseado com atenção. O produto utilizado neste trabalho foi adquirido através da empresa Buschle & Lepper S.A. e suas especificações técnicas encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição Química da Soda Cáustica

Determinação	Unidade	Especificação
Concentração (NaOH)	%	97-100
Carbonatos (Na₂CO₃)	%	< 0,6
Cloretos (NaCl)	%	< 0,03
Ferro (Fe)	ppm	< 6
Densidade	g/cm ³	2,13-2,20
Aspecto Visual		Escamas

Fonte: BUSCHLEE & LEPPER citado por HARTMANN, 2016.

Neste trabalho, optou-se por trabalhar com uma solução 10 Molar, baseado em trabalhos anteriormente realizados por estudantes do curso de Engenharia de Infraestrutura na UFSC em Joinville (CASCAES, 2016; HARTMANN, 2016; LEITE, 2016; MACCARINI, 2015, ROCHA, 2016; VITORINO, 2016). A fim de se obter uma solução com essa molaridade, foi necessário calcular a quantidade de água para determinada quantidade de hidróxido de sódio, que é apresentado nas equações a seguir.

$$Molaridade = \frac{Concentração \left(\frac{g}{L}\right)}{1 L (água)} \times \frac{1 mol}{Massa Molar} \quad (3.1.1)$$

A Massa Molar do NaOH é $22,989\text{g} + 15,999\text{g} + 1,007\text{g} = 39,995\text{g}$. Portanto, utilizando a fórmula descrita na Equação 1, tem-se:

$$10 = \frac{C}{1L} \times \frac{1}{39,995g} \leftrightarrow C = 399,95 \frac{g}{L} \quad (3.1.2)$$

No entanto, esse cálculo seria utilizado com um produto 100% constituído por NaOH. Como a soda cáustica utilizada contém cerca de 97% de NaOH em sua composição, é necessário utilizar uma regra de três simples invertida a fim de se obter o real valor.

$$\begin{aligned} 399,95 &\rightarrow 100\% \\ X &\rightarrow 97\% \\ 0,97 \times X &= 399,95g \leftrightarrow X = 412,32g \end{aligned} \quad (3.1.3)$$

Dessa forma, foi preciso dissolver 412,32g de soda cáustica em 1 litro de água, a fim de se obter uma solução 10 Molar.

3.1.4 Silicato de Sódio

O silicato de sódio, popularmente conhecido como vidro líquido, pode ser comercializado em pedra ou estado líquido. O produto utilizado neste trabalho foi fornecido pela empresa Buschle & Lepper S.A. e suas especificações podem ser analisadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição química do silicato de sódio

Determinação	Unidade	Especificação
Densidade a 25°C	g/cm ³	1,39-1,42
Viscosidade	cP	250-500
Óxido de sódio	%	8,50-9,20
Óxido de silício	%	27,80-30,50
Sólidos totais	%	37-39
Relação (SiO ₂ /Na ₂ O)		3,02-3,59
Água	%	61-63

Fonte: BUSCHLE & LEPPER S/A., 2014

O Na_2SiO_3 não precisa ser dissolvido em água para sua utilização na argamassa geopolimérica. No presente trabalho, o Na_2SiO_3 líquido foi misturado com a solução 10 Molar de NaOH para serem utilizados como ativadores.

3.1.5 Areia

A areia utilizada para a preparação das argamassas foi fornecida pela empresa Supremo Concretos. Segundo estudos realizados em 2016 que utilizaram a mesma areia, ela é de origem sílica. Ademais, a granulometria foi determinada utilizando peneiradores vibratórios de acordo com a NBR 7214 (HARTMANN, 2016; LEITE, 2016).

De acordo com a NBR7214 a areia utilizada possui 1,4% de fração grossa, 23% da fração média-grossa, 31% da fração média fina e 34% da fração fina. Além das frações previstas em norma, o agregado utilizado possui 11,2% de material passante na peneira 1,2 mm. (HARTMANN, 2016, p.29)

3.2 MÉTODOS

A metodologia experimental deste trabalho consistiu em determinar as formulações através de ensaios no estado fresco, produzir as misturas, moldar corpos de prova e realizar ensaios no estado endurecido para verificar sua resistência à compressão. Essa parte é especialmente importante, uma vez que é possível analisar a influência gerada pela substituição do metacaulim por CCA.

3.2.1 Ensaio no Estado Fresco

Os ensaios no estado fresco são utilizados para verificar a trabalhabilidade da argamassa, propriedade que está relacionada com a consistência e a plasticidade. Neste trabalho, o ensaio realizado foi o da mesa de consistência, especificado na norma NBR13276 (ABNT, 2002). Os procedimentos foram realizados a fim de se determinar a composição das formulações.

3.2.2 Definição das Formulações

A fim de definir as formulações de argamassa geopolimérica com quantidades certas de matérias-primas, foi necessário encontrar uma relação S/L adequada para a dosagem escolhida, conferindo uma boa trabalhabilidade à argamassa, e encontrar uma porcentagem ideal para o NaOH e o Na₂SiO₃ que inibisse o surgimento da eflorescência.

Foi determinado uma dosagem de 1:1 a fim de analisar a influência da CCA na matriz geopolimérica e atingir uma trabalhabilidade adequada. Então, baseado em estudos prévios de trabalhos que ocorreram em paralelo, foi definida a relação S/L como 1,6 e as porcentagens de NaOH e Na₂SiO₃ como 65% e 35%, respectivamente. Esses valores referentes aos ativadores têm se mostrado eficazes em outros trabalhos para evitar o surgimento de eflorescência nas amostras. No entanto, essa relação S/L resultou em uma argamassa pouco consistente. Então, foram realizados novos testes aumentando essa relação em +0,5 a cada vez e, após a realização de vários ensaios na mesa de consistência, chegou-se à uma relação ideal S/L de 1,75. É importante ressaltar que a água adicionada é apenas a presente na solução 10 Molar de NaOH.

Uma vez fixado os parâmetros e realizados os ensaios na mesa de consistência, cujos procedimentos podem ser analisados na seção referente aos ensaios no estado fresco, foram produzidos corpos de provas cilíndricos a fim de verificar o surgimento de eflorescência na amostra de referência, ou seja, 100% de metacaulim e sem a utilização de CCA. Após um período de aproximadamente 10 dias de cura, foi observado um leve resquício de eflorescência, o que motivou a alteração de 35% de Na₂SiO₃ para 40%. Um novo ensaio na mesa de consistência foi realizado a fim de se verificar a abertura da argamassa com nova formulação (Figura 9), resultando em uma abertura de 240±5 mm, o que foi considerado aceitável.

Figura 9 – Diâmetro do espalhamento da argamassa geopolimérica de referência na mesa de consistência



Fonte: Autor, 2017.

Posteriormente, as demais formulações das argamassas geopoliméricas foram desenvolvidas a partir da amostra de referência, variando a porcentagem de substituição de metacaulim por CCA em +6,25% a cada formulação, com o objetivo de atingir 25% de CCA. Os dados referentes às formulações podem ser verificados a seguir, na Tabela 7.

Tabela 7 – Formulações das argamassas geopoliméricas com quantidades de matérias-primas em gramas

Nome	S/L	Metacaulim	CCA	Areia	Sol. NaOH	Silicato
REF	1,75	750,00	0,00	750,00	345,62	280,20
F1	1,75	703,13	46,88	750,00	345,62	280,20
F2	1,75	656,25	93,75	750,00	345,62	280,20
F3	1,75	609,38	140,63	750,00	345,62	280,20
F4	1,75	562,50	187,50	750,00	345,62	280,20

Fonte: Autor, 2017.

3.2.3 Preparação da Argamassa e Moldagem dos Corpos de Prova

As argamassas foram produzidas com o auxílio de um misturador mecânico. Todas as 5 formulações foram preparadas e moldadas da mesma forma.

Para a elaboração das argamassas, foram pesados os componentes de acordo com a Tabela 7. Posteriormente, foi realizada a mistura da solução de NaOH com Na_2SiO_3 através de um misturador magnético por 5 minutos. Então, foram realizados os seguintes procedimentos:

(i) mistura da fonte de aluminossilicato com os ativadores no misturador mecânico por 5 minutos na velocidade 112 rpm; (ii) mistura realizada manualmente com o auxílio de uma espátula por 1 minuto; (iii) mistura da fonte de aluminossilicato com ativadores no misturador mecânico por 5 minutos na velocidade 112 rpm; (iv) adição da areia sem pausar o misturador, ainda na velocidade 2, por mais 2 minutos.

Para a moldagem dos corpos de prova utilizados para execução do ensaio de compressão e de propriedades físicas, foram utilizados moldes prismáticos metálicos com dimensões 4x4x16cm com paredes removíveis, formando três compartimentos quando montado, lubrificados com óleo SAE 15W-40. Logo após o preparo da argamassa, foi colocada uma porção equivalente à metade no volume total final em cada compartimento, espalhando com o auxílio de um nivelador e, então, foram aplicadas 30 quedas através da mesa de adensamento. Finalizada a primeira série de golpes, foi introduzido o restante do volume da argamassa, nivelando o material, e aplicadas 30 quedas novamente. Após isso, os corpos de prova foram rasados utilizando uma régua metálica, e então deixados em estufa à 40°C por 24 horas. Depois desse período, os corpos de prova foram desmoldados e deixados em temperatura ambiente, até completar 28 dias de cura.

3.2.4 Ensaios no Estado Endurecido

Os ensaios propostos para o estado endurecido têm como objetivo verificar as propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova. Esses ensaios foram realizados com 28 dias de cura.

3.2.4.1 Resistência à tração na flexão e à compressão

Os ensaios de resistência mecânica foram realizados no laboratório de mecânica do Centro Universitário Católica de Santa Catarina, em Joinville, com o acompanhamento do instrutor Robson Luiz Rosa. O experimento foi executado em uma máquina universal para ensaios mecânicos modelo EMIC 23-100, de acordo com a NBR 13279 (2005).

Primeiro, foi executado o ensaio de flexão com o auxílio de um acessório acoplado à máquina, no qual os corpos de prova de tamanho 4x4x16 cm foram rompidos ao meio. Dessa forma, cada corpo de prova gerou 2 pedaços que foram utilizados para o ensaio de compressão

(cujo acessório utilizado para obtenção dos resultados é diferente do anterior) e para os ensaios de propriedades físicas.

3.2.4.2 Propriedades físicas

Estes ensaios foram realizados no LabIconS, na UFSC. O método utilizado para determinação da densidade aparente (D_{ap}), porosidade aparente (P_{ap}) e absorção de água (A_{H_2O}) foi o Ensaio de Arquimedes (PENNING; GRELLNER, 1989), e consiste em:

- a) Secagem das amostras em estufa a aproximadamente 100°C e pesagem, a fim de se obter a massa seca (m_s);
- b) Imersão dos corpos de prova em água por 72h, seguido de pesagem imersa, o que resulta no valor da massa imersa (m_i);
- c) Pesagem da amostra após secagem de sua superfície, que se refere à massa saturada com superfície seca (m_{sss}).

Depois de coletados todos os dados, é necessário aplicar as seguintes equações:

$$D_{ap} = \frac{m_s}{m_{sss} - m_i} \quad (3.2.1)$$

$$A_{H_2O} = \frac{m_{sss} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3.2.2)$$

$$P_{ap} = \frac{m_{sss} - m_s}{m_{sss} - m_i} \times 100 \quad (3.2.3)$$

As pesagens da amostra seca e com superfície seca foram feitas em uma balança com precisão $\pm 0,01g$; já a pesagem imersa foi feita na balança com o auxílio de uma cesta dentro do recipiente cheio de água. Nessa parte, é importante ficar atento para que a cesta não entre em contato com o recipiente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

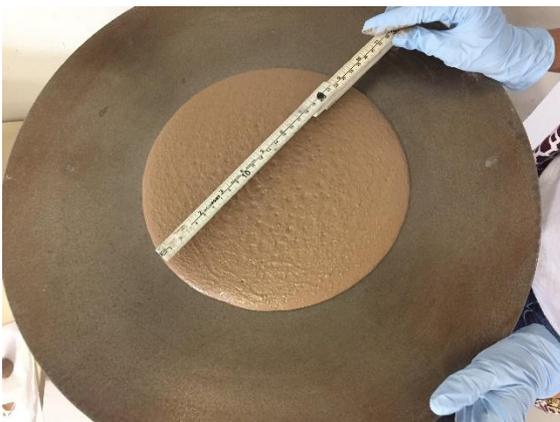
Este capítulo apresenta o resultado dos ensaios realizados no estado fresco e endurecido, seguido de análises e discussões.

4.1 MESA DE CONSISTÊNCIA

O ensaio de consistência foi utilizado para definir a relação entre sólido e líquido que deveria ser empregado a fim de obter uma argamassa com uma trabalhabilidade adequada. Uma vez que ainda não existe norma para trabalhabilidade de argamassa geopolimérica, foi estabelecido que os resultados de espalhamento deveriam ficar em 240 ± 20 mm, que indica que a fluidez está apropriada para moldagem.

A formulação de referência, que contém 0% de CCA em sua composição, resultou em uma abertura de 240 ± 5 mm (Figura 10). Já a argamassa com 25% de CCA apresentou uma abertura de 250 ± 5 mm (Figura 11).

Figura 10 – Diâmetro de espalhamento da argamassa de referência



Fonte: Autor, 2017.

Figura 11 – Diâmetro de espalhamento da argamassa de com 25% de CCA.



Fonte: Autor, 2017.

A abertura maior obtida com a CCA é compreensível, vez que, de acordo com Hartmann (2016), a substituição de 25% de metacaulim por CCA requer uma quantidade de

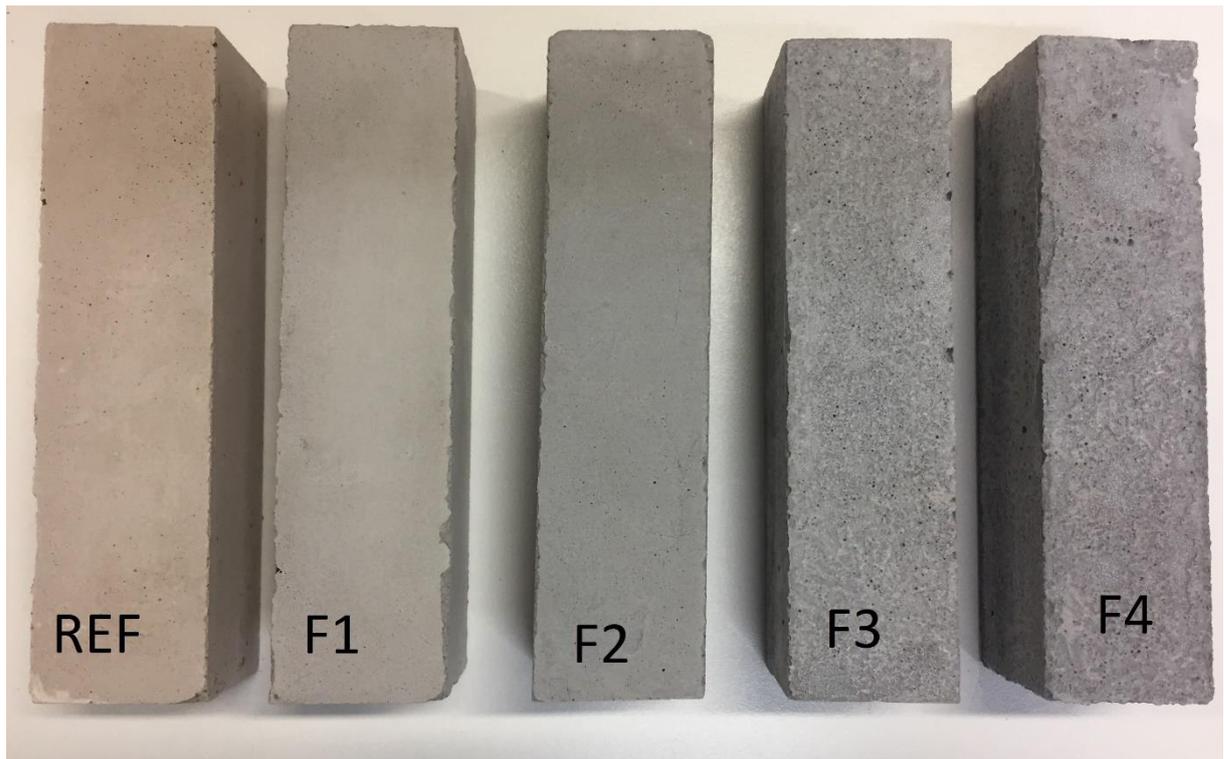
água 7% menor que a quantidade utilizada em uma argamassa que contém apenas metacaulim, a fim de obter-se o mesmo diâmetro de abertura.

Isso pode ser justificado pela área específica de cada componente, apresentado anteriormente na seção de materiais. Devido ao metacaulim possuir uma maior área específica, ele adsorve mais água do que a CCA.

4.2 ANÁLISE MORFOLÓGICA

Foram moldados três corpos de prova para cada formulação, o que resultou na produção de 15 corpos de prova. Na Figura 12 é possível verificar a imagem de um dos três corpos de prova de cada formulação.

Figura 12 – Corpos de prova prismáticos com formulações de 0% a 25% de CCA



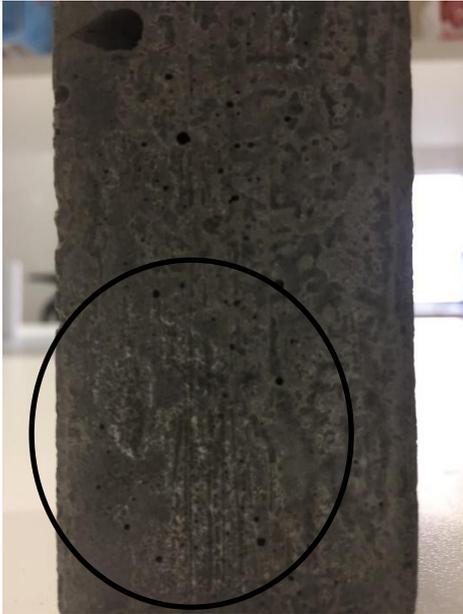
Fonte: Autor, 2017.

É possível verificar pequenos pontos de eflorescência nas argamassas F3 e F4 com 18,75% (Figura 13a) e 25% (Figura 13b) de CCA, respectivamente. Além disso, essas argamassas apresentaram espaços vazios em sua superfície e uma rugosidade maior em relação aos demais corpos de prova. Os pontos mais claros da argamassa de referência não são pontos

de eflorescência pois apresentam coloração rosada, então é provável serem resultantes de um acúmulo de metacaulim.

Figura 13 – Surgimento de eflorescência na superfície das argamassas geopoliméricas

a) Corpo de prova da argamassa geopolimérica com 18,75% de CCA



b) Corpo de prova da argamassa geopolimérica com 25% de CCA



Fonte: Autor, 2017.

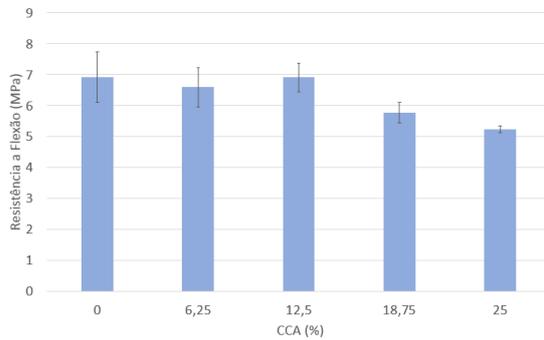
4.3 RESISTÊNCIA A FLEXÃO E COMPRESSÃO

Os ensaios de flexão e compressão foram feitos com 28 dias de cura, e os resultados apresentados neste trabalho representam um valor médio para 3 corpos de prova.

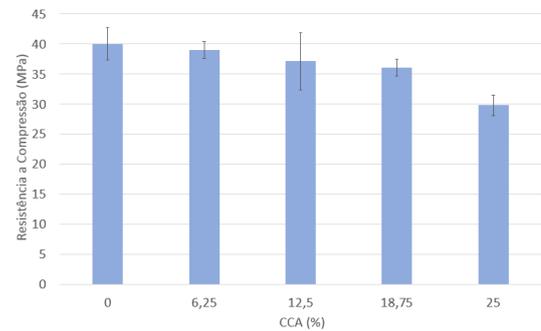
A partir do gráfico de resistência à flexão (Figura 14a) e de resistência à compressão (Figura 14b), é possível verificar que a resistência mecânica não foi afetada significativamente até a amostra com substituição de 12,5% de metacaulim por CCA, levando em consideração o desvio padrão. Já as amostras com 18,75% e 25% apresentaram uma queda mais significativa na resistência tanto à flexão quanto à compressão.

Figura 14 – Resistência mecânica de argamassas geopoliméricas com 28 dias de cura

a) Resistência a flexão



b) Resistência a compressão



Fonte: Autor, 2017.

Como já citado anteriormente, a relação Si/Al no geopolímero está relacionada à resistência mecânica. Em termos práticos, esses resultados indicam que é possível a substituição parcial do metacaulim por CCA, mantendo os valores de resistência à compressão e à tração na flexão muito próximos aos da referência.

Na resistência a flexão, as amostras com 18,75% e 25% de CCA apresentaram valores médios 15% e 19% menores que os da amostra de referência, respectivamente, enquanto as amostras com 6,25% e 12,5% apresentaram valores médios com no máximo 3% de diferença da referência. Já quanto à compressão, as amostras com 18,75% e 25% apresentaram valores médios 10% e 31% abaixo do valor de referência, porcentagens maiores que as demais amostras, que mostraram uma queda máxima de 5% em relação à referência. A relação Si/Al aumenta quando CCA é adicionada ao geopolímero, uma vez que esse material é rico em sílica, mas não possui quantidade significativa de alumina em sua composição. Isso implica em uma queda na resistência mecânica, resultante do desequilíbrio entre as razões molares dentro da estrutura do material. Segundo as composições químicas dos materiais utilizados neste trabalho, as argamassas que apresentaram uma queda considerável na resistência a flexão e a compressão (18,75% e 25% de CCA em sua formulação) possuem relações Si/Al superiores a 4,3.

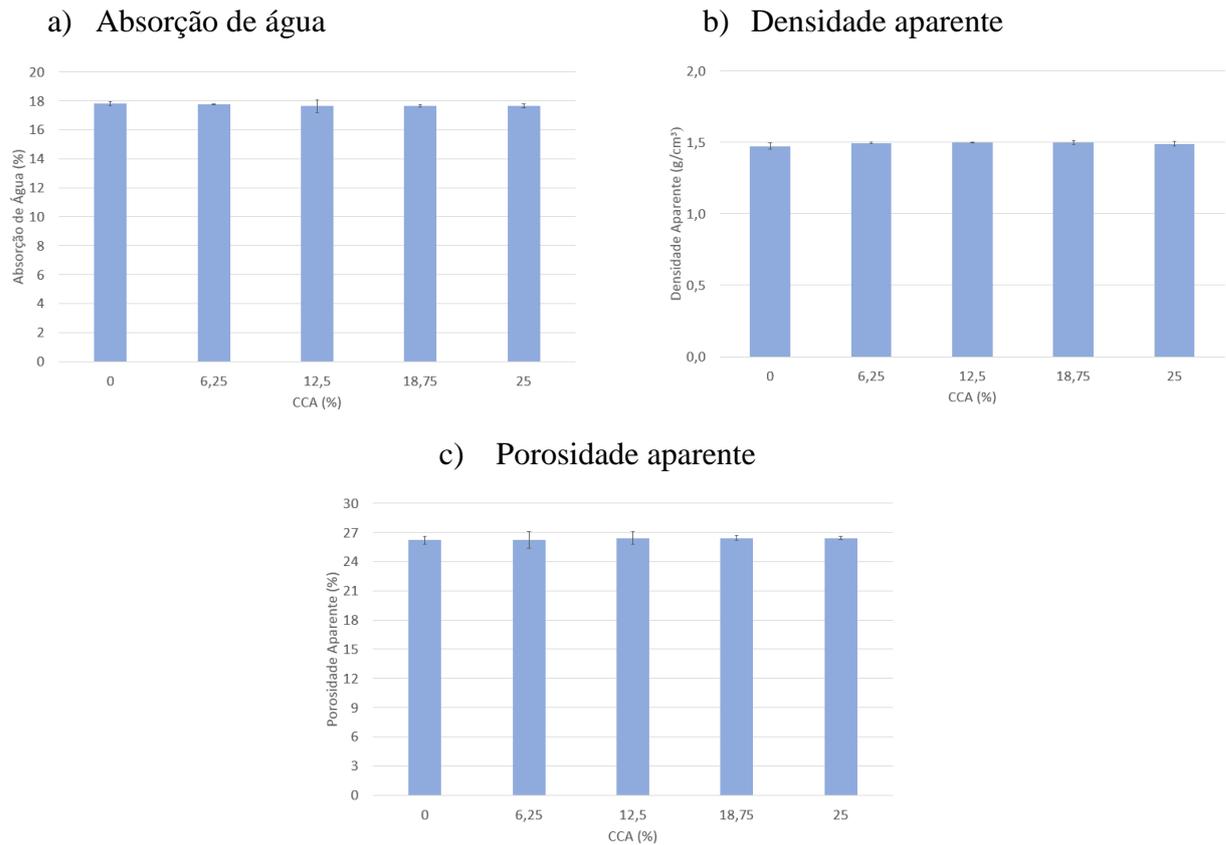
4.4 PROPRIEDADES FÍSICAS: ABSORÇÃO DE ÁGUA, DENSIDADE APARENTE E POROSIDADE APARENTE

Os ensaios de propriedades físicas foram realizados logo após os ensaios de resistência mecânica. As metades que não foram rompidas à compressão foram quebradas em pedaços

menores, resultando em 6 corpos de prova para cada formulação. Esses corpos de prova foram utilizados para os ensaios, conforme descrito na seção anterior.

A seguir, é possível verificar os resultados referentes à absorção de água (Figura 15a), densidade aparente (Figura 15b) e porosidade aparente (Figura 15c).

Figura 15 – Propriedades físicas das argamassas geopoliméricas



Fonte: Autor, 2017.

Analisando os gráficos, percebe-se que a absorção de água, porosidade e densidade aparente da argamassa foram as que sofreram menores impactos com a substituição do metacaulim pela CCA, já que suas variações são bem pequenas, especialmente quando se analisa o desvio padrão das amostras. Assim, percebe-se que é possível substituir o metacaulim pela CCA sem que suas propriedades físicas sejam afetadas.

5 CONCLUSÃO

A partir do ensaio na mesa de consistência, observou-se que a viscosidade do material aumenta à medida que a CCA é adicionada em substituição ao metacaulim. O metacaulim apresenta uma área específica maior que a CCA, o que implica em uma maior adsorção do líquido pelo primeiro material. A argamassa com 25% de CCA apresentou uma abertura 4% maior que a argamassa com 0% de CCA.

Já em relação à resistência mecânica houve uma alteração um pouco mais significativa. Houve um declínio na resistência de argamassas com 18,75% e 25%. No entanto, apesar de serem inferiores à argamassa de referência, esses corpos de prova apresentaram resistência à compressão superior à 27 MPa. Dessa forma, é necessário verificar a resistência necessária para a utilização da argamassa, o que indica que a utilização de porcentagens maiores de 18,75% ainda pode ser viável.

Outra relação que é afetada quando se retira o metacaulim e se acrescenta a CCA é a razão entre Na/Al, cujos valores tendem a aumentar uma vez que a alumina presente no metacaulim está sendo extraída. Isso indica que há um acréscimo de cátions livres (Na^+) dentro da estrutura geopolimérica e assim, há uma tendência a manifestação de eflorescência na superfície da argamassa geopolímero. Neste trabalho, apareceu eflorescência nas argamassas com 18,75% e 25% de CCA, que apresentavam razões Na/Al superiores a 0,9. Dessa forma, essas porcentagens não podem ser utilizadas em argamassas de habitações, mas pode ser aplicada em outras obras, como drenagem urbana ou afins.

Quanto às propriedades físicas (porosidade aparente, densidade aparente e absorção de água), não houve uma alteração significativa com qualquer porcentagem de CCA. Todos os resultados ficaram com valores próximos ao da argamassa de referência, o que indica que é possível substituir o metacaulim pela CCA, até 25%, sem influenciar nessas propriedades.

Conclui-se, assim, que há a possibilidade de substituição parcial do metacaulim por CCA, desde que seja avaliada a finalidade desta argamassa. É sugerido que, para construções habitacionais, verifique-se a quantidade de CCA adicionada ou utilize algum outro resíduo em conjunto, a fim de balancear as razões Si/Al e Na/Al. Uma alternativa interessante é o lodo gerado do processo de anodização do alumínio, que é um resíduo que possui grande quantidade de alumina em sua composição.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Diminuir a variação da porcentagem de cinza de casca de arroz para até 18%;
- Utilizar a cinza de casca de arroz em conjunto com outro resíduo que tenha grande quantidade de alumina em sua composição.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais pozolânicos - requisitos.** Rio de Janeiro, 2012.

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.

BUSCHLE & LEPPER S/A. **Ficha técnica: silicato de sódio neutro Q-79.** Departamento de gestão de qualidade, 2014.

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.

CIMENTO Portland versus ligantes geopoliméricos: Considerações econômicas sobre as implicações do mercado de carbono no custo dos concretos. Disponível em: www.geopolymer.com.br/PDF/cpxgp.pdf. Acesso em: 13 mai. 2017.

COSTA, P. G. S. F. S. **Análise de argamassas geopoliméricas expostas a temperaturas elevadas em edifícios industriais.** 2014. 104f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Minho, 2014.

CUNHA, M. J. F. M. **Durabilidade de geopolímero monofásicos.** 2013. 99f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Minho, 2013.

CUNHA, T. F. R. F. **Desenvolvimento de geopolímeros porosos para isolamentos térmicos não tóxicos.** 2014. 99f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Minho, 2014.

DAVIDOVITS, J. **30 years of successes and failures in geopolymer applications: Market trends and potential breakthroughs**. Geopolymer Institute. Geopolymer 2022 Conference, Melbourne, Australia, 2002. 16 p.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer cement: a review**. France: Géopolymère Institut, 2013.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. **Journal of thermal analysis**, vol. 37, p. 1633-1656, 1991. Reimpressão.

DAVIDOVITS, J. **Properties of geopolymer cements**. Geopolymer Institute. Alkaline Cements and concretes, Kiev, Ukraine, 1994. 19 p

DIAS, N. A. A. **Geopolímeros: Contributos para a redução das eflorescências**. 2012. 69f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Minho, 2012.

DUXSON et al. The role of inorganic polymer technology in the development of ‘green concrete’. **Cement and Concrete Research**, vol. 37, p. 1590-1597, 2007.

FICHA técnica do metacaulim hp ultra. Disponível em:

www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html. Acesso em: 13 mai. 2017.

FOLETTI, E. L., et al. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Quim. Nova**, vol. 28, n. 6, p. 1055-1060, ago. 2005.

FROM ancient concrete to geopolymers. França: Geopolymer Institute, 1996. Autor desconhecido. Disponível em: www.geopolymer.org/fichiers_pdf/GPAMENG.pdf. Acesso em: 19 mai. 2017.

GEOPOLÍMERO para principiantes. Disponível em:

www.geopolymer.com.br/PDF/apresentacao.pdf. Acesso em: 18 mai. 2017.

HARTMANN, E. A. **Argamassa geopolimérica utilizando pó de alumínio como agente formador de poros**. 2016. 54 f.. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

HASSELL. **University of Queensland Global Change Institute**. Disponível em: <http://www.hassellstudio.com/en/cms-projects/detail/the-university-of-queensland-global-change-institute/>. Acesso em: 18 jun. 2017.

LEITE, J. M. **A influência da vermiculita em argamassa geopolimérica com adição de nanotitânia**. 2016. 47 f.. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

MACCARINI, H. S. **Desenvolvimento de geopolímero a partir do uso de metacaulim**. 2015. 58 f.. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, 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, 55., 2013, Gramado. **Anais...** Gramado: IBRACON, 2013.

MILLIKEN. **GeoAer: controlled density geopolymer**. Milliken Infrastructure Solutions, LLC, 2014a. Disponível em: http://infrastructure.milliken.com/site/user/files/44/GeoAer-Sales-Sheet_2014.pdf. Acesso em: 18 jun. 2017.

MILLIKEN. **GeoSpray: geopolymer mortar**. Milliken Infrastructure Solutions, LLC, 2014b. Disponível em: <https://www.estormwater.com/sites/estormwater.com/files/GeoSpray%20-%20Structural%20Rehabilitation%20Whitepaper.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2017.

MILLIKEN. **GeoSpray: case study**. Milliken Infrastructure Solutions, LLC, 2016. Disponível em: http://infrastructure.milliken.com/site/user/files/40/Wattles-Road-over-the-Rouge-River-5_10_17.pdf. Acesso em: 18 jun. 2017.

NEMATOLLAHI, Behzad; SANJAYAN, Jay; SHAIKH, Faiz Uddin Ahmed. **Synthesis of heat and ambient cured one-part geopolymer mixes with different grades of sodium silicate**. *Ceramics International*, v. 41, n. 4, p. 5696-5704, 2015.

ORIGEM do cimento geopolimérico. Disponível em: www.geopolimero.com.br/PDF/Origem.pdf. Acesso em: 12 mai. 2017.

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.

PILECCO NOBRE. **Sílica ecológica e energia renovável**. Disponível em: www.pileconobre.com.br/silica/. Acesso em: 07 jun. 2017.

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

PUERTAS, F. Cementos de escorias activadas alcalinamente: situación actual y perspectivas de futuro. **Materiales de Construcción**, Espanha, Vol. 45, n. 239, p. 53-64, jul./ago./set. 1995.

ROCHA, T. **A influência da nano-tio2 em pastas geopoliméricas**. 2016. 55 f.. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

SILVA, 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. 288 f.. Tese (Pós-graduação em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SILVA, S. P. **Balanco mineral brasileiro 2001: Caulim**. Departamento Nacional de Produção Mineral – Ministério de Minas e Energia, 2001. Disponível em: www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-caulim. Acesso em: 13 mai. 2017.

UNC CHARLOTTE. **Urban Eden: materials**. 2017. Disponível em: <http://urbaneden.uncc.edu/house/architecture/materials/geopolymer>. Acesso em: 18 jun. 2017.

VASSALO, E. A. S. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado**. 2013. 103 f.. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

VITORINO, P. **Desenvolvimento de pastas geopoliméricas porosas com uso de peróxido de hidrogênio**. 2016. 54 f.. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

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