

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA
EDUARDO ANDRÉ HARTMANN

**ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA UTILIZANDO PÓ DE ALUMÍNIO COMO
AGENTE FORMADOR DE POROS**

Joinville

2016

EDUARDO ANDRÉ HARTMANN

**ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA UTILIZANDO PÓ DE ALUMÍNIO COMO
AGENTE FORMADOR DE POROS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao centro de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Centro tecnológico de Joinville, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Engenheiro de Infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Senff

Joinville

2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Dr. Luciano Senff pela incrível dedicação que teve durante este período de orientação. Tenho muito orgulho dos trabalhos que desempenhamos juntos ao longo deste último ano.

À Universidade Católica de Joinville por ter cedido espaço e equipamentos para ensaios de resistência

À minha mãe Haide que nunca deixou de me apoiar e ao meu pai.

À minha irmã Aline, que com seus exemplos de vida me trazem motivação.

À minha namorada Luiza que me traz uma alegria de viver e motivação para continuar batalhando em busca de um ótimo futuro.

RESUMO

A produção de cimento Portland representa 5% das emissões de CO₂ no mundo. Como consequência disto o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis frente aos aglomerantes tradicionais está em alta. Geopolímeros representam a terceira geração de cimentos e se caracterizam pela ativação de uma matriz inorgânica (fonte de Al₂O₃ e SiO₂) com uma solução alcalina. A pesquisa e produção de geopolímeros leves/porosos tem atraído maior atenção nos últimos anos. Neste trabalho, argamassas geopoliméricas porosas foram produzidas com o uso de metacaulim e cinza de casca de arroz (fonte de alumina e sílica), hidróxido de sódio (ativador alcalino) e pó de alumínio como agente formador de poros. Os resultados demonstram que o pó de alumínio tem influência direta na porosidade, consistência, densidade e resistência mecânica. Argamassas geopoliméricas porosas com densidade de 1300 kg/m³ foram produzidas, mostrando que o pó de alumínio pode ser utilizado em aplicações que requeiram materiais leves.

Palavras-Chave: Geopolímeros, Argamassa, Cinza de Casca de Arroz, Metacaulim, Porosidade

ABSTRACT

Portland cement production accounts for 5% of the world's CO₂ emissions. As a result, the development of more sustainable alternatives to traditional binders on the rise. Geopolymers represent the third generation of cements and are characterized by the activation of an inorganic matrix (Al₂O₃ and SiO₂ source) with an alkaline solution. The research and production of lightweight/porous geopolymers has attracted more attention over the past years. In this work, porous geopolymeric mortars were produced with the use of metakaolin and rice husk ash (source of alumina and silica), sodium hydroxide (alkaline activator) and aluminum powder as pore forming agent. The results demonstrate that aluminum powder has a direct influence on porosity, consistency, density and mechanical strength. Porous geopolymeric mortars with a density of 1300 kg/m³ were produced, showing that aluminum powder can be used in applications requiring lightweight materials.

Keywords: Geopolymer, Mortar, Rice Husk Ash, Metakaolin, Porosity

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1.	Objetivo Geral	15
1.2.	Objetivos Específicos	15
2.	GEOPOLÍMEROS (CIMENTOS ALCALI-ATIVADOS)	16
2.1.	Fontes de Aluminossilicatos	16
2.1.1	Caulim e Metacaulim	17
2.1.2	Resíduos da Indústria e Agricultura	17
2.1.3	Reatividade das Matérias primas.....	18
2.2.	Ativação Alcalina de Aluminossilicatos	18
2.3.	Geopolímeros na Construção Civil	20
2.4.	Geopolímeros leves.....	23
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1.	Materiais.....	26
3.2	Metodologia experimental.....	31
3.2.1	Definição e produção das amostras	31
3.2.2	Ensaio no estado Fresco	34
3.2.3	Ensaio no estado endurecido	35
3.2.4	Propriedades físicas: absorção, densidade aparente e porosidade aberta	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
4.1	Caracterização das Matérias Primas	38
4.2	Caracterização do agente formador de poros.....	39
4.3	Ensaio no estado fresco	40
4.4	Análise morfológica	41
4.5	Propriedades físicas: absorção, densidade aparente e porosidade aberta	44
4.6	Resistência à compressão.....	46
4.7	Resistência à flexão	48

5	CONCLUSÃO.....	50
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	51
	REFERÊNCIAS	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição de aglomerante geopolimérico	19
Figura 2 – Modelo de ativação de geopolímeros	20
Figura 3 – Artefatos geopoliméricos para construção civil: a) espuma geopolimérica b) tijolo maciço c) blocos vazados d) blocos maciços	21
Figura 4 – Estrutura química e aplicações dos geopolímeros	22
Figura 5 – Aeroporto brisbane west wellcamp (austrália) foram consumidos 40 mil m ³ concreto geopolimérico no pavimento do pátio de manobras	22
Figura 6 – Trabalhos publicados sobre geopolímeros e geopolímeros leves	23
Figura 7 – Materiais que compõem as argamassas em estudo	25
Figura 8 – Plano experimental contendo os ensaios para caracterização das matérias primas e amostras	26
Figura 9 – Matérias primas utilizadas na preparação da argamassa geopolimérica: a) metacaulim, b) cinza de casca de arroz, c) naoh em escamas, d) areia, e) solução naoh 10 molar.	27
Figura 10 – Distribuição do tamanho das partículas de metacaulim.	28
Figura 11 – Difração de raios-x do metacaulim	28
Figura 12 – a) curvas granulométrica da sílica de casca de arroz b) difratograma de sílica de casca de arroz.	29
Figura 13 – a) composição granulométrica da areia b) peneirador vibratório	30
Figura 14 – a) distribuição granulométrica do pó de alumínio b) amostra de pó de alumínio	31
Figura 15 – Fluxograma de elaboração dos corpos de prova	32
Figura 16 – Equipamentos utilizados na preparação da argamassa geopolimérica porosa – a) misturador intensivo, b) espátulas e moldes c) contador de golpes d) mesa de adensamento	33
Figura 17 – a) argamassa despejada no molde imediatamente após a produção b) 20 minutos após moldagem c) conformada 30 minutos após a moldagem	33

Figura 18 – Detalhes ensaio de espalhamento – a) aparelho para determinação da consistência da argamassa b) corpo de prova desmoldado c) corpo de prova após abatimento	34
Figura 19 – Equipamentos utilizados nos ensaios no estado endurecido – a) estufa b) máquina universal para ensaios mecânicos c) ensaio de flexão d) ensaio de compressão	35
Figura 20 – a) equipamento para ensaio de arquimedes b) corpos de prova após período de secagem c) corpos de prova imersos em água.	36
Figura 21 – Ensaio de espalhamento para determinação da razão sólido/líquido a ser utilizada.	40
Figura 22 – Resultado do ensaio de espalhamento para as 5 amostras	41
Figura 23 – Corpos de prova prismáticos com formulações de 0 a 0,3% de pó de alumínio	42
Figura 24 – Caracterização ótica das argamassas geopoliméricas com 0, 0,05, 0,1, 0,2, 0,3% de pó de alumínio 28 dias de cura.	43
Figura 25 – Densidade aparente das argamassas geopoliméricas com 7 e 28 dias	44
Figura 26 – Absorção de água das argamassas geopoliméricas com 7 e 28 dias	45
Figura 27 – Porosidade aberta das argamassas geopoliméricas com 7 e 28 dias de cura	45
Figura 28 – Resistência à compressão de geopolímeros com 7 e 28 dias de cura.	46
Figura 29 – Gráfico comparativo compressão/densidade aos 7 e 28 dias	47
Figura 30 – Corpos de prova após ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.	47
Figura 31 – Resistência à tração de geopolímeros com 7 e 28 dias de cura.	48
Figura 32 – Corpos de prova após a ruptura por tração na flexão aos 28 dias.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – razões ideais para formulação de geopolímeros	19
Tabela 2 – composição química do metacaulim determinada por frx.	28
Tabela 3 – composição química da cca determinada por frx.	28
Tabela 4 – características da soda caustica	30
Tabela 5 – argamassa de referência	32
Tabela 6 – relações calculadas para a argamassa de referência	32
Tabela 7 – formulações com diferentes porcentagens de cinza de casca de arroz	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

σ – Tensão

μm – Micrometro

A – Área

Al – Alumínio

Al_2O_3 – Óxido de Alumínio (Alumina)

Ca – Cálcio

CaO – Óxido de cálcio

CCA – Cinza de casca de arroz

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

CPII-E – Cimento Portland com escória de alto forno

CPII-Z – Cimento Portland com material pozolânico

DRX – Difração por raio-X

EDS – Energy Dispersive X-ray Spectrometer

fck – Resistência característica do concreto a compressão

Fe – Ferro

g – grama

g/cm^3 – Gramas por centímetro cúbico

H – Hidrogênio

H_2O – Água

H_2O_2 – Peróxido de Hidrogênio (água oxigenada)

K – Caulinita

kgf – Quilograma força

kN – Kilonewton

K_2O – Óxido de Potássio

L – Mica

m^2/kg – metro quadrado por quilograma

Mg – Magnésio

MgO – Óxido de Magnésio

Máx – Máximo

min – Minuto

MK – Metacaulim

mm – Milímetro

MPa - Megapascal

Na – Sódio

Na₂CO₃ – Carbonato de Sódio

Na₂O – Óxido de Sódio

NaCl – Cloreto de Sódio

NaOH – Hidróxido de Sódio

NBR – Norma Brasileira

O – Oxigênio

OH – Hidroxila

P₂O₅ – Pentóxido de Fósforo

ppm – pontos por milhão

Q – Quartzo

REF. – Referência

S/L – Sólido/Líquido

Si – Silício

SiO₂ – Óxido de Silício (Sílica)

SVA – Sílica Verde do Arroz

TiO₂ – Dióxido de Titânio

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

Vel. – Velocidade

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material de grande importância para a engenharia civil. Na verdade, pode-se dizer que o concreto tem grande importância em diversas áreas da sociedade. A humanidade desenvolveu este abrangente material, que pode assumir qualquer formato devido suas características fluidas no período de pré-cura, e desenvolveu uma série de atribuições para o mesmo. Habitações, indústrias, rodovias, calçadas, pontes e represas são exemplos das numerosas aplicações que foram criadas.

O concreto é o segundo material mais consumido no mundo, sendo superado somente pela água (RUBENSTEIN, 2012) e este consumo só tende a crescer.

Em estudos desenvolvidos pelos institutos International Energy Agency e World Business Council for Sustainable Development (CEMENT TECHNOLOGY ROADMAP, 2009), em 2006 a produção global de cimento foi de 2,55 bilhões de toneladas e, em um cenário de baixo crescimento, estes valores podem chegar a 3,69 bilhões de toneladas em 2050. O grande problema do enorme consumo de cimento, é que sua produção demanda altos níveis de energia, gerando cerca de 0,8 kg de CO₂ para cada kg de cimento. Estes fatos resultam em um dos materiais mais poluidores do planeta, sendo responsável pela emissão de 5% da taxa global de CO₂ (CEMENT TECHNOLOGY ROADMAP, 2009).

Tendo em vista esta alta geração de CO₂ na fabricação do cimento, nos últimos anos tem-se dado atenção para estudos que reduzam o impacto ambiental gerado pelo concreto. Uma linha de pesquisa é a que trabalha com adições naturais para reduzir a porcentagem de clínquer no cimento. Outra linha de pesquisa são os geopolímeros ou cimentos de ativação alcalina, que se caracterizam como longas cadeias de moléculas inorgânicas e não geram índices expressivos de dióxido de carbono, pois são considerados materiais naturais minimamente processados e, conseqüentemente, existe um movimento mundial na pesquisa para aplicações em infraestrutura.

Apesar desta tecnologia ter sido criada em 1978, seu crescimento em termos de pesquisa e aplicação só se expandiu nos últimos 6 anos. Para isto, podemos elencar dois pontos: primeiro, o fato da humanidade estar priorizando alternativas mais sustentáveis em todos os meios de produção e, segundo, pelo fato de vários órgãos de padronização mundial terem retirado a palavra cimento Portland de seus manuais e definirem os padrões apenas levando em conta a resistência final do concreto. Para Davidovits, (2016) isto é muito importante para a aplicação em larga escala dos Geopolímeros, pois agora estes podem seguir padrões e serem consumidos em larga escala. Este é o caso do aeroporto Brisbane West Wellcamp, Austrália que tem seu aeródromo concretado com geopolímeros atendendo as especificações exigidas (DAVIDOVITS, 2016).

Nos últimos anos, geopolímeros tem atraído grande atenção da comunidade científica, indústria e usuários. Isto se dá pelo fato destes aglomerantes terem alta resistência inicial, baixa permeabilidade, boa resistência química e excelente resistência ao fogo (DUXSON, 2007). Por causa destas características, geopolímeros são uma boa alternativa ao cimento Portland.

Além de aplicações já tradicionais para a construção civil, a pesquisa e produção de geopolímeros leves/porosos tem atraído maior atenção da comunidade científica. Com intuito de desenvolver materiais com benefícios ambientais, os geopolímeros porosos possuem características adicionais aos materiais existentes. Isolamento térmico, adsorção de metais pesados e manutenção de pH em estação de tratamento de resíduos são algumas das funcionalidades extras apresentadas por estes novos materiais (NOVAIS, 2016).

Contudo, nota-se que apesar das pesquisas avançarem nesta área, faltam estudos mais aprofundados do impacto causado pela porosidade em argamassas geopoliméricas.

Neste contexto, esta pesquisa tecnológica se concentra na investigação de uma argamassa leve/porosa que será feita a partir da adição de pó de alumínio como agente formador de poros em uma argamassa geopolimérica produzida com metacaulim e cinza de casca de arroz (resíduo da agroindústria).

Parâmetros físicos e mecânicos serão avaliados com o intuito de identificar a influência deste agente porogênico na matriz geopolimérica.

Objetivos

1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver uma argamassa geopolimérica com estrutura porosa utilizando alumínio como agente formador de poros.

1.2. Objetivos específicos

- Produzir cinco formulações distintas de argamassas, trabalhando a variação da porcentagem de pó de alumínio.
- Determinar a quantidade ideal de agente formador de poros.
- Avaliar a capacidade do pó de alumínio como agente formador de poros em argamassas geopoliméricas.
- Produzir corpos de prova para avaliar as propriedades físicas (absorção de água, porosidade aberta, densidade aparente), propriedades mecânicas (resistência a compressão e flexão) e microestrutura do material com 7 e 28 dias de cura.

Após a introdução e os objetivos descritos nesta seção, as próximas seções do trabalho estão organizadas da seguinte maneira. O capítulo 2 contém toda a contextualização necessária para o entendimento geral do objetivo proposto, assim como o estado da arte dos temas de geopolímeros e suas aplicações. O capítulo 3 traz todas as informações referentes a matérias primas utilizadas e também o detalhamento de todos os ensaios propostos para o trabalho. O capítulo 4 expõe os resultados obtidos, assim como a caracterização dos produtos gerados na pesquisa. A conclusão é o último capítulo e tem papel de avaliar o projeto englobando todas as fases e também uma avaliação dos resultados obtidos no mesmo.

2. GEOPOLÍMEROS (CIMENTOS ALCALI-ATIVADOS)

Geopolímeros são considerados a terceira geração de cimentos depois da cal e do tradicional cimento Portland. O termo “geopolímeros” é genericamente utilizado para descrever um material amorfo de aluminossilicatos (DUXON, 2007).

O termo geopolímero foi criado pelo professor Joseph Davidovits em 1978, para nomear um polímero produzido com matérias primas inorgânicas. A princípio, o desenvolvimento destes materiais tinha como objetivo a criação de um polímero que fosse capaz de suportar grandes temperaturas e serem resistentes a fogo, características normalmente ausentes em polímeros de matriz orgânica. De acordo com o Geopolymer Institute (WHAT IS A..., 2012), existem 9 classes diferentes de geopolímeros, porém a classe com melhor aplicabilidade à indústria da construção civil é a de materiais de matriz aluminossilicato, que pode substituir integralmente o cimento Portland no concreto. As matérias primas para a produção deste material são, por exemplo, o caulim (fonte natural) e cinza volante (escória de usinas termoelétricas).

Geopolímeros também podem ser descritos como: polímeros inorgânicos, cimentos álcali-ativados, geocimentos, cerâmicas de ligação alcalina, hidrocerâmicas, etc. Essencialmente, todos estes materiais descritos utilizam o mesmo processo químico, que consiste na polimerização do monômero (-Si-O-Al-O-) (SINGH, 2015).

2.1. Fontes de aluminossilicatos

Qualquer material inorgânico que é fonte de aluminossilicatos, e se apresenta no estado amorfo, pode ser utilizado como matéria-prima no processo de ativação alcalina. Estes materiais podem ser obtidos direto da natureza, como é o caso do mineral caulim, ou podem ser utilizados resíduos agrícolas e/ou industriais como

cinzas da queima de biomassa, cinzas volante e escória de alto-forno (TASHIMA, 2012).

2.1.1 Caulim e metacaulim

O termo caulim é originário da palavra chinesa Kauling (colina alta) e se refere a colina Jauchau Fu, que possui uma jazida a muito tempo explorada. Esta argila é formada principalmente pela caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e possui coloração branca devido ao baixo teor de ferro (SILVA, 2001).

O Caulim além de ser um material muito importante, é um dos 6 materiais mais abundantes da crosta terrestre. Suas principais utilizações são: produção de artigos cerâmicos, indústria de papel e indústria de tintas e vernizes. O Brasil detém cerca de 28% suas das reservas mundiais (SILVA, 2001).

Metacaulim é o nome dado para o produto resultante de um tratamento térmico feito no caulim. Este processo é chamado de calcinação. O resultado deste processo gera um material pozolânico de grande reatividade. Basicamente, a calcinação retira a água presente na caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), com isso a estrutura do material é modificada, resultando em uma fonte de aluminossilicatos amorfa ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) chamada de metacaulinita. O processo é conhecido como desidroxilação e é apresentado na Equação 1 (ILIC, 2010).



2.1.2 Resíduos da indústria e agricultura

Um ponto positivo dos geopolímeros, é a utilização de resíduos da indústria e agricultura como aglomerantes. Atualmente, a norma Brasileira para cimento Portland já prevê a adição de alguns resíduos, sendo o CII-E (adição de escória de 6-34%) e CII-Z (adição de material pozolânico a 14%). Porém, ao contrário das adições em cimentos tradicionais, nos geopolímeros estes materiais são propriamente a base dos aglomerantes. Os resíduos mais comumente utilizados são: escória de alto-forno, cinzas volantes e cinzas provenientes da queima de biomassa (SHI, 2011).

Materiais alternativos também podem ser utilizados com fonte de Al e Si. Em estudo feito por Rui Novais (2016), fez uso de restos de lâmpadas fluorescentes como fonte de SiO_2 na composição. Os resultados indicaram um aumento na resistência para amostras com 12,5% de adição deste resíduo.

2.1.3 Reatividade das matérias primas

Apesar de todos estes materiais serem fontes de Al_2O_3 e SiO_2 outras características podem influenciar na aplicabilidade do material. O tamanho das partículas tem uma relação direta com a quantidade de água utilizada na mistura, por exemplo, geopolímeros produzidos com metacaulim que tem partículas muito menores que as do cimento. Por outro lado, partículas muito grandes podem ter baixa solubilidade no meio alcalino tendo como resultado a deficiência na composição das cadeias poliméricas. Essas fontes de aluminossilicatos também possuem grande variação entre os níveis dos dois principais componentes.

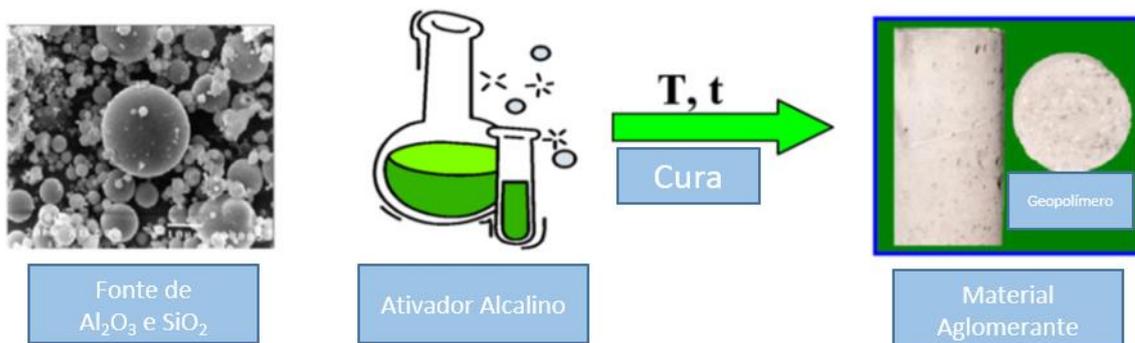
De acordo com a literatura, a razão estequiométrica entre Sílica e Alumina deve ser de ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=3,0$) (DAVIDOVITS, 2016). Porém, como a quantidade de partículas reativas é incerta, na prática essas razões podem não ser tão exatas. Para cinzas resultantes da queima de materiais vegetais, como casca de arroz e bagaço de cana-de-açúcar, temos o problema de altas taxas de carbono na composição. O carbono também promove a absorção de água causando um aumento da porosidade (CASTALDELLI, 2013).

2.2. Ativação alcalina de aluminossilicatos

De modo simplificado, Geopolímeros nascem de uma reação do tipo sol-gel a partir da união de uma parte líquida (com uma grande concentração alcalina) e uma parte sólida (fonte de Al_2O_3 e SiO_2). Para que a reação ocorra de forma eficiente, vários fatores devem ser considerados no balanço estequiométrico da solução. Maccarini (2015) fez análises referentes a determinação de uma relação ideal de Sólido/Líquido para pastas de metacaulim ativadas com NaOH, chegando a uma relação ideal de 1,4.

De acordo com Novais (2016) resíduos que, em tempos atuais, tem como destino aterros sanitários, podem ser usados como fontes de alumina e sílica. No mesmo estudo, fez-se o uso de lâmpadas fluorescentes na composição de uma pasta geopolimérica. Os resultados mostraram um aumento na resistência a compressão com a substituição de metacaulim pelo resíduo em questão. Estes valores podem ser explicados pela variação da razão Si/Al gerado pela substituição de parte da mistura.

Figura 1 – Composição de aglomerante geopolimérico



Fonte: Shi (2010, p. 754).

Na composição de uma solução de geopolimerização, existem algumas relações na literatura que servem como parâmetros a serem seguidos. O estudo feito por Duxson (2007) apresentou estas relações:

Tabela 1 – Razões ideais para formulação de Geopolímeros

Relações indicadas literatura (molar)		
Mínimo		Máximo
0,2	$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	0,48
3,3	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	4,5
0,8	$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	1,6
10	$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	25

Fonte: Duxson, 2007.

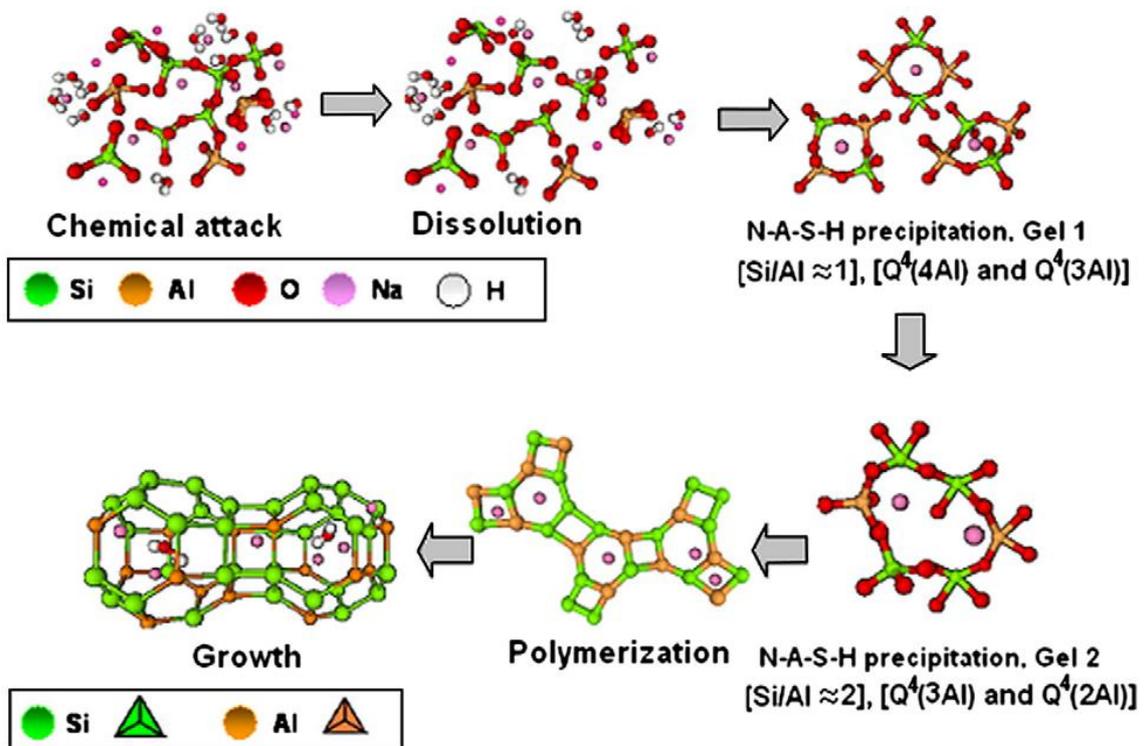
Diferentemente da hidratação do cimento Portland que resulta em C-S-H- gel ($\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$), a ativação alcalina dos geopolímeros é completamente diferente. Glukhovsky (1967) separa em três estágios o processo de ativação alcalina, sendo:

- ✓ Primeiro estágio: *destruição-coagulação*;

- ✓ Segundo estágio: *coagulação-condensação*;
- ✓ Terceiro estágio: *condensação-cristalização*.

O produto final do terceiro estágio que se encontra de forma cristalina é um aluminossilicato alcalino hidratado $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ tipo gel [N–A–S– |H gel]. A descrição do modelo encontra-se melhor explicada na Figura 2.

Figura 2 – Modelo de ativação de Geopolímeros



Fonte: (Shi, 2010)

2.3. Geopolímeros na Construção Civil

Atualmente, existem nove diferentes classes de geopolímeros, mas é na construção civil que estes polímeros inorgânicos despertam mais interesse. Este fato é explicado pelo fato destes polímeros inorgânicos possuírem performance comparável aos aglomerantes cimentícios tradicionais. Na *Figura 4* são apresentadas as diversas aplicações que os geopolímeros podem assumir. Um ponto importante relacionado às aplicações, é a estrutura química que compõe os geopolímeros.

Relações diferentes de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ implicam em diferentes características de resistência e comportamento dos materiais. (DAVIDOVITS, 2008)

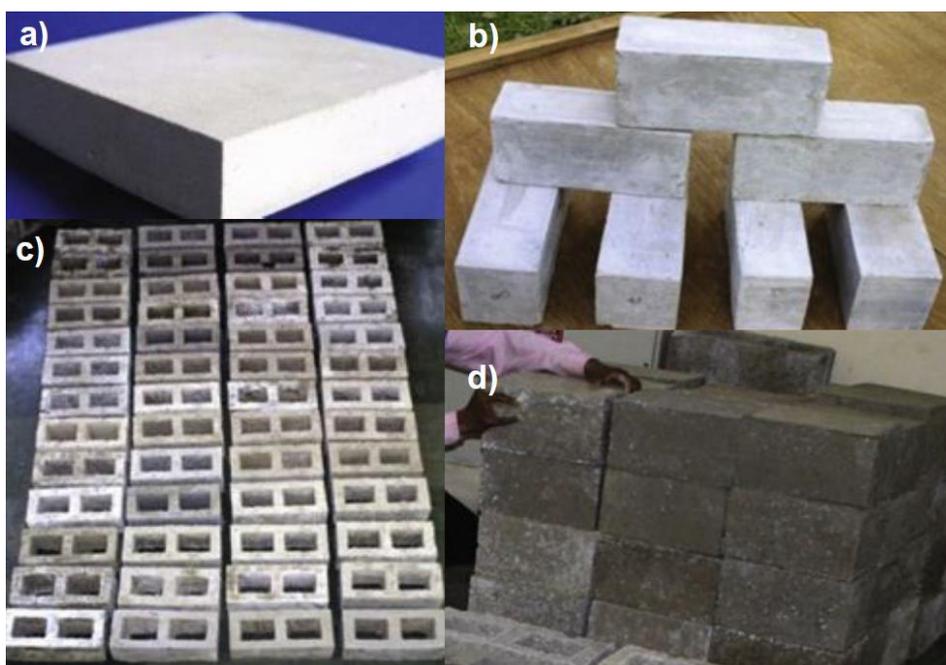
Além disso, a obtenção dos geopolímeros é menos prejudicial ao meio ambiente se comparado ao cimento Portland. Este material possui um grande potencial de aplicação na engenharia como: pontes, pavimentação, tratamento de resíduos, hidráulica, engenharia subterrânea, etc.

As aplicações podem ser das mais variadas formas. Singh et al. (2015) apresentou diversas aplicações de geopolímeros em argamassas e concreto. Blocos de alvenaria são uma boa opção de aplicação, pois apresentam um fácil controle de produção.

Na Figura 3 tem-se diversos tipos de blocos produzidos com matriz geopolimérica.

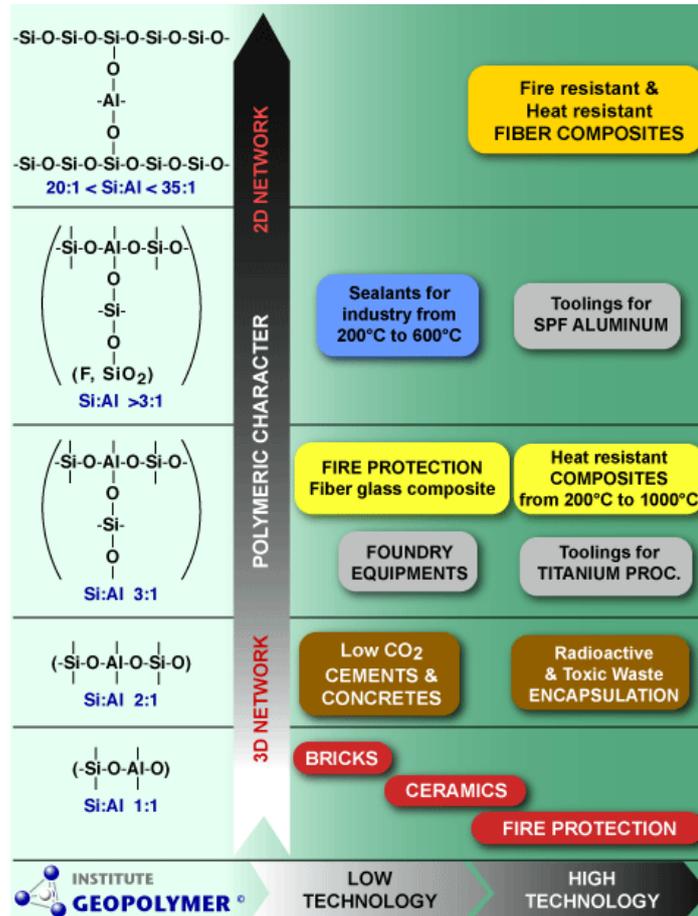
A construção do aeroporto de Brisbane pode ser considerado uma marco importante para esta nova classe de concretos. Ao todo, foram consumidas 100 mil toneladas de concreto geopolimérico, fazendo com que esta obra ganhasse o título de maior obra do mundo neste segmento. É importante ressaltar que além da enorme quantidade de concreto utilizado, toda a obra foi concretada em loco e em condições ambientes.

Figura 3 – Artefatos geopoliméricos para construção civil: a) espuma geopolimérica b) tijolo maciço c) blocos vazados d) blocos maciços



Fonte: SING et al., 2015

Figura 4 – Estrutura Química e Aplicações dos Geopolímeros



Fonte: www.geopolymer.org, 2016

Figura 5 – Aeroporto Brisbane West Wellcamp (Austrália) foram consumidos 40 mil m³ concreto geopolimérico no pavimento do pátio de manobras



Fonte: The Chronicle 29 Sept. 2014

2.4. Geopolímeros leves

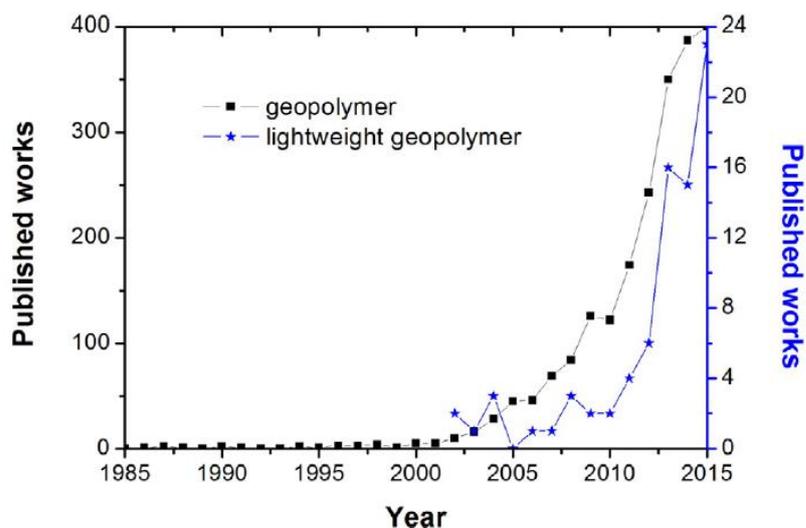
Além dos usos tradicionais na construção civil como produção de blocos de alvenaria e pavimentação, novos usos podem ser propostos para este novo material. Geopolímeros porosos tem sido largamente estudados por prover várias funcionalidades. A Figura 6 evidencia o crescente interesse da comunidade acadêmica com temas relacionados com geopolímeros e geopolímeros leves.

Geopolímeros leves tem várias aplicações tanto na construção civil, como na indústria como um todo. A aplicação mais trivial é na utilização deste material como isolante térmico. Suas características de leveza e resistência ao fogo possuem um grande atrativo comercial (NOVAIS, 2016b).

A utilização destes materiais com o propósito de atuar como solução tampão para tratamentos de efluente também foi estudada por Rui Novais (2016a). As vantagens dos geopolímeros neste tipo de aplicação é o maior tempo de atuação e a fácil remoção dos materiais após o seu uso.

A produção de geopolímeros porosos tipicamente envolve a adição de algum agente formador de poros (peróxido de hidrogênio (H_2O_2), pós de alumínio e zinco) diretamente na argamassa geopolimérica. A incorporação destes agentes interfere na geopolimerização, consistência e resistência dos materiais formados. (NOVAIS, 2016b)

Figura 6 – Trabalhos publicados sobre geopolímeros e geopolímeros leves



Fonte: Scopus, 2016

Tendo em vista, as diversas interferências causadas pela presença de agentes porogênicos em argamassas geopoliméricas, algumas características que propiciem a elaboração de argamassas porosas devem ser esperadas:

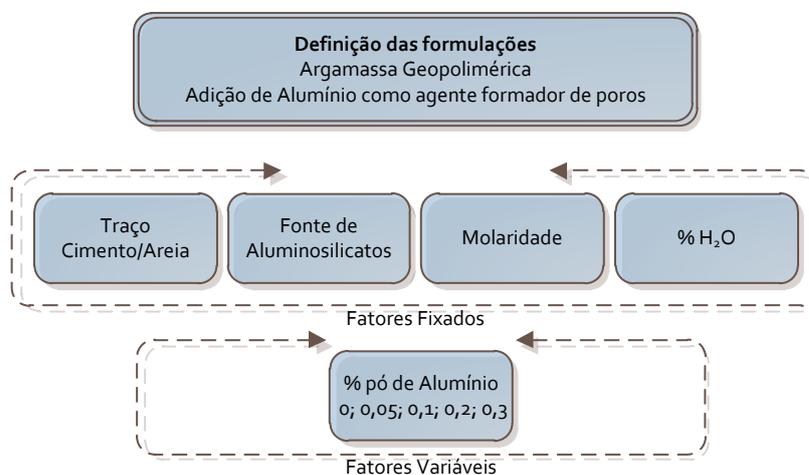
- Boa trabalhabilidade – A argamassa deve ter uma consistência e plasticidade adequadas, a ponto de garantir a fácil aplicação da mistura nos moldes definidos para o estudo. A viscosidade também implica na geração de bolhas, quanto mais viscoso o meio, maior a força necessária para a criação de vazios.
- Capacidade de aprisionamento das bolhas – Para que ocorra a formação de bolhas no interior das amostras, a argamassa deve ter quantidade suficiente de aglomerante para que ocorra um bom encapsulamento.
- Homogênea – A produção da argamassa precisa ser definida a ponto de que todos os materiais presentes nela estejam misturados uniformemente. A maneira com que se adiciona o agente formador de poros também deve ser especificada para manter-se uma matriz de poros igualmente distribuída.
- Resistência mecânica – Os poros reduzem a resistência mecânica dos materiais, por isso argamassas geopoliméricas devem prover resistência mínima, a ponto de garantir seu uso nas diversas aplicações.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo serão apresentados os materiais, métodos e equipamentos utilizados para o desenvolvimento de argamassas geopoliméricas porosas. Para uma completa análise dos efeitos causados pelo pó de alumínio nas amostras, um plano experimental foi elaborado objetivando caracterizar as propriedades das argamassas no estado fresco e no endurecido.

A Figura 7 apresenta a proposta para a definição das formulações empregadas no estudo. Como um dos objetivos do presente trabalho é avaliar o impacto proporcionado pelo pó de alumínio, procurou-se fixar todos os fatores exceto a quantidade de agente porogênico presente na argamassa.

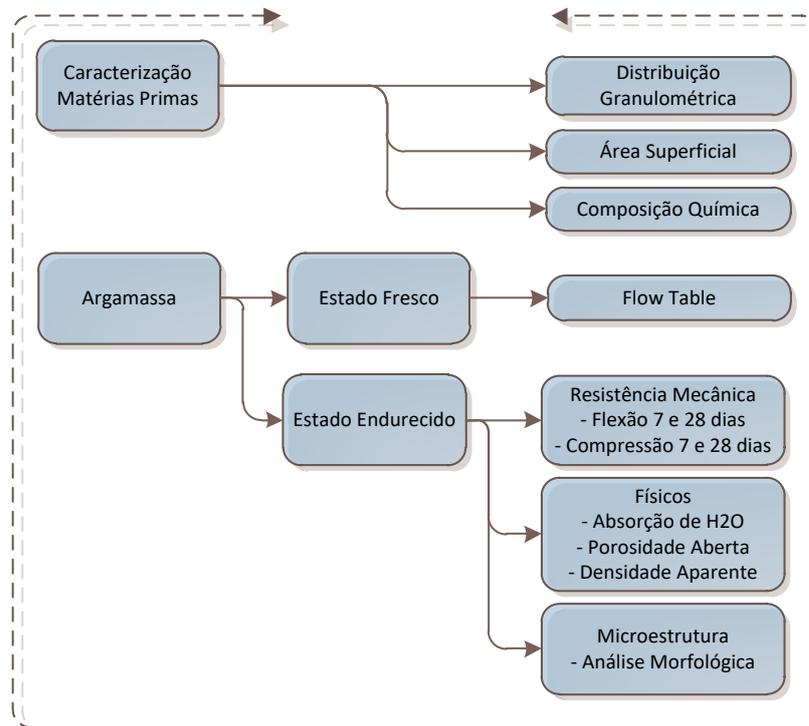
Figura 7 – Materiais que compõem as argamassas em estudo



Fonte: Autor, 2016

Após a definição das formulações, o plano experimental elaborado prevê uma série de caracterizações no estado fresco e endurecido da argamassa. Isto é necessário para termos um mapa completo da influência que o pó de alumínio tem nas amostras. A Figura 8 esquematiza todos os ensaios definidos para o estudo.

Figura 8 – Plano experimental contendo os ensaios para caracterização das matérias primas e amostras



Fonte: Autor

Toda a produção dos corpos de prova foi conduzida nos Laboratórios de Materiais de Construção e Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável, ambos localizados na UFSC Joinville. Para a caracterização dos corpos de prova, alguns ensaios foram feitos com auxílio do Departamento de engenharia civil do Centro Universitário Católica Santa Catarina – Unidade Joinville e o Núcleo de Pesquisa em Materiais Cerâmicos e Compósitos (CERMAT) do Departamento de Engenharia Mecânica UFSC Florianópolis.

Ao todo, foram produzidos 30 corpos de prova prismáticos no padrão 4x4x16cm, sendo 3 réplicas de cada formulação para 7 e 28 dias de cura.

3.1. Materiais

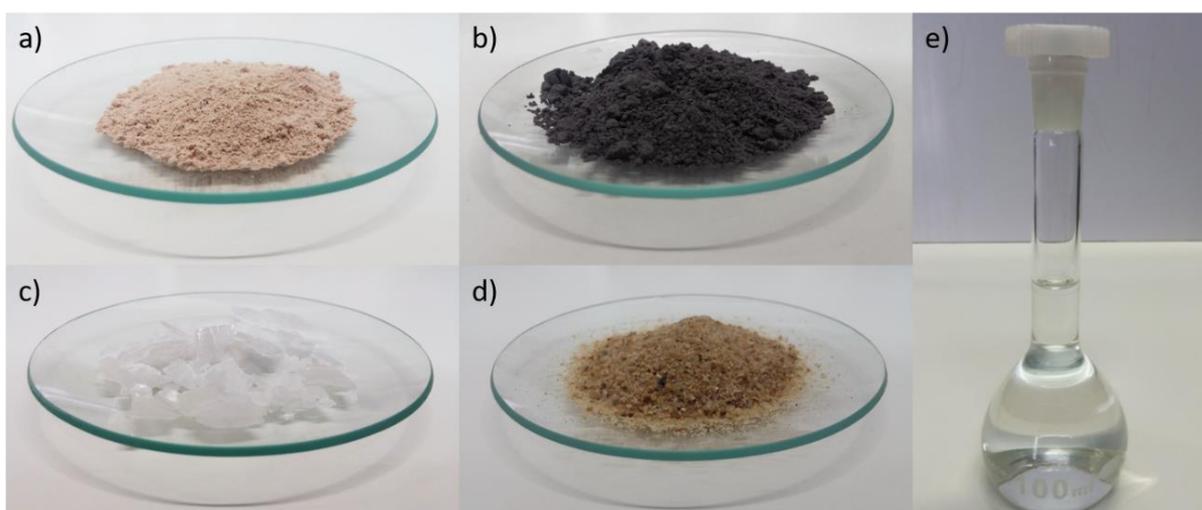
Na sua concepção genérica, argamassa é um material cimentício composto por água, cimento e areia. Para o presente estudo, procurou-se trabalhar com a substituição do cimento Portland tradicional por um aglomerante com características

mais sustentáveis que são os geopolímeros. Com esta substituição, a argamassa proposta para o trabalho, possui os seguintes materiais:

- Metacaulim e cinza de casca de arroz (CCA) como aglomerantes, desempenhando a natureza do cimento Portland
- Solução de $H_2O + NaOH$ ajustada em 10 molar como agente ativador alcalino
- Areia como agregado miúdo

A Figura 9 apresenta todas as matérias primas utilizadas para a produção da argamassa geopolimérica.

Figura 9 – Matérias primas utilizadas na preparação da argamassa geopolimérica: a) Metacaulim, b) Cinza de casca de arroz, c) NaOH em escamas, d) Areia, e) Solução NaOH 10 molar.



Fonte: Autor, 2016

Na argamassa produzida empregou-se 75% de metacaulim e 25% de cinza de casca de arroz. O metacaulim foi adquirido da empresa Metacaulim Brasil com o nome Metacaulim HP Ultra. Este produto segue as especificações da norma NBR15894/10. A CCA é produzida pela empresa SVA – Sílica Verde do Arroz Ltda e é resíduo da queima da casca de arroz para geração de energia.

A composição química das duas fontes de metacaulim, foi determinada por fluorescência de raio-X e o resultado encontra-se na Tabela 2. Com estes dados é possível observar que o metacaulim possui quantidades expressivas, tanto de Al_2O_3 quanto de SiO_2 .

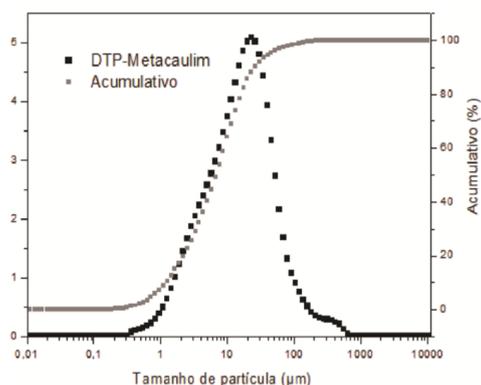
Tabela 2 – Composição química do metacaulim determinada por FRX.

METACAULIM										
Óxidos	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O 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.

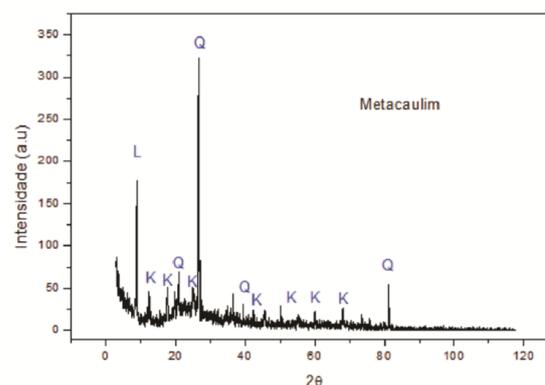
Outro dado importante obtido pela difração de raio-X é o grau de cristalinidade dos componentes no metacaulim. Foram identificadas as seguintes fases cristalinas: caulinita (K), quartzo (Q) e mica (L).

Figura 10 – Distribuição do tamanho das partículas de Metacaulim.



Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT, 2015.

Figura 11 – Difração de raios-X do Metacaulim



Na CCA a presença de SiO₂ representa mais de 90% de sua composição (Tabela 3), o que confere ao resíduo, ótimas características, podendo equilibrar a razão Al₂O₃/SiO₂ em 3 como visto em seção anterior. (página18)

Tabela 3 – Composição química da CCA determinada por FRX.

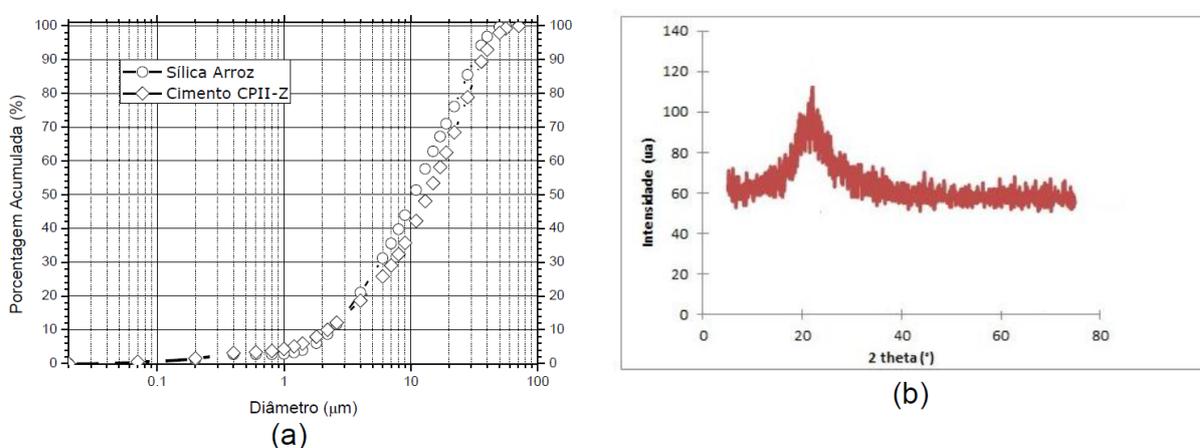
CINZA DE CASCA DE ARROZ										
Óxidos	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	SO ₃
Teor (%)	0,00	0,36	0,05	1,40	0,32	0,32	0,04	0,45	91,48	0,15
Perda ao fogo	3,5%									
Área Específica	21142 m ² /kg									

Fonte: Marangon, p. 3 (2013)

Como a CCA é proveniente de uma matriz orgânica, é esperado que esta tenha a presença de carbono em sua composição. De acordo com a NBR 12653, que rege a produção de materiais pozolânicos a partir de resíduos, a perda ao fogo é limitada a 6%. Desta forma observa-se que as quantidades de matéria orgânica, presentes na CCA, são menores que o especificado em norma.

Ensaio de granulometria e difração por raio-x foram apresentados por Marangon (2013) (Figura 12). O estudo concluiu que a CCA possui uma estrutura altamente amorfa.

Figura 12 – a) Curvas Granulométrica da Sílica de Casca de Arroz b) Difratoograma de Sílica de Casca de Arroz.



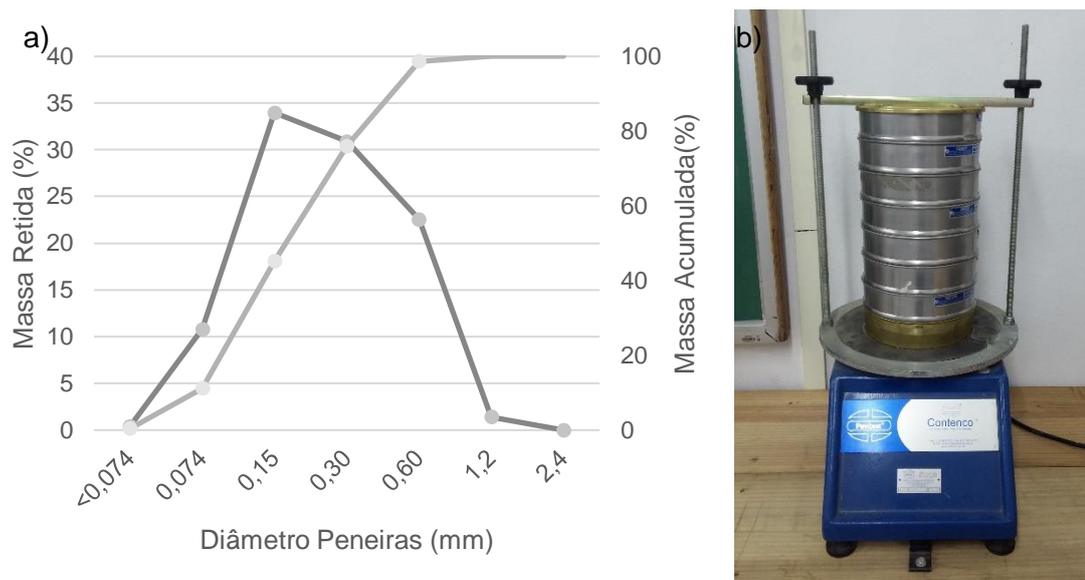
Fonte: Marangon, (2013, p. 4)

O agregado utilizado na composição dos traços foi uma areia de origem silícea, fornecida pela empresa Supremo. A granulometria desta areia foi determinada utilizando um peneirador de areias vibratório juntamente com peneiras nos tamanhos 0,074, 0,15, 0,3, 0,6, 1,2 e 2,4 mm. A amostra apresentou teor de umidade inferior a 0,1%. A composição granulométrica, assim como o aparelho, são apresentados na *Figura 13*.

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.

Para que a polimerização ocorra, é necessário a utilização de um ativador alcalino que atuará na dissolução dos materiais inorgânicos. O agente ativador utilizado para a produção das amostras foi uma solução de Hidróxido de Sódio (NaOH) contendo 10 mols por litro de solução.

Figura 13 – a) Composição granulométrica da areia b) peneirador vibratório



Fonte: Autor, 2016

O hidróxido de sódio utilizado no trabalho, também conhecido popularmente por soda cáustica, é fabricado pela empresa Buschle & Lepper S/A e suas especificação técnicas encontram-se na

Tabela 4.

Tabela 4 – Características da Soda Caustica

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

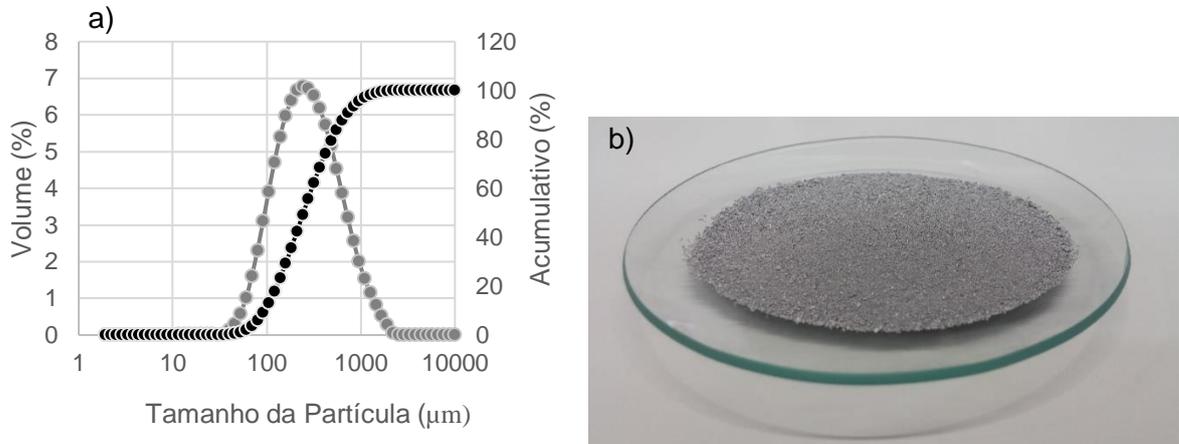
Fonte - Departamento Técnico - Buschle & Lepper S/A, 2016

Tendo como objetivo principal do trabalho a formação de poros em argamassas geopoliméricas, empregou-se um agente formador de poros. Pó de alumínio cedido pela empresa Alcoa foi utilizado para a formação dos poros.

Uma análise feita no CERMAT avaliou a variação granulométrica das partículas de alumínio, os detalhes encontram-se na Figura 14. O tamanho da partícula de alumínio interfere diretamente na velocidade de reação e no tamanho dos poros. Testes preliminares mostraram que granulometrias maiores de pó tendem a

criar bolhas maiores com um tempo de reação maior. Ao contrário, granulometrias mais finas tendem a criar poros menores e com uma rápida velocidade de reação.

Figura 14 – a) Distribuição granulométrica do pó de alumínio b) Amostra de pó de Alumínio



Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT, 2016.

3.2 Metodologia experimental

Conforme apresentado no início deste capítulo (*Figura 7 e Figura 8*), o trabalho possui duas etapas que formam a metodologia experimental. A primeira parte consiste na determinação das formulações, produção das misturas e tempo de cura. A segunda parte refere-se aos ensaios de caracterização propostos. Esta etapa é importante para definirmos qualitativamente as amostras e, conseqüentemente, gerar maior entendimento sobre os efeitos criados, principalmente, pela adição do pó de alumínio na argamassa.

3.2.1 Definição e produção das amostras

Tendo a composição química de todas as matérias primas, uma formulação foi proposta para que atenda as propriedades físicas e químicas e se encaixem nas diversas relações propostas pela literatura. Levando em conta todos estes parâmetros a argamassa REF foi definida (Tabela 5). A partir dela, cinco formulações com adição de pó de alumínio foram criadas para o estudo. As porcentagens de pó de alumínio utilizadas na mistura foram 0, 0,05, 0,1, 0,2 e 0,3%.

Tabela 5 – Argamassa de referência

FORMULAÇÃO ARGAMASSA REFERÊNCIA				
Traço	MK	CCA	NaOH	% H ₂ O S/L
1:2	75%	25%	10 molar	1,5

Fonte: Autor, 2016

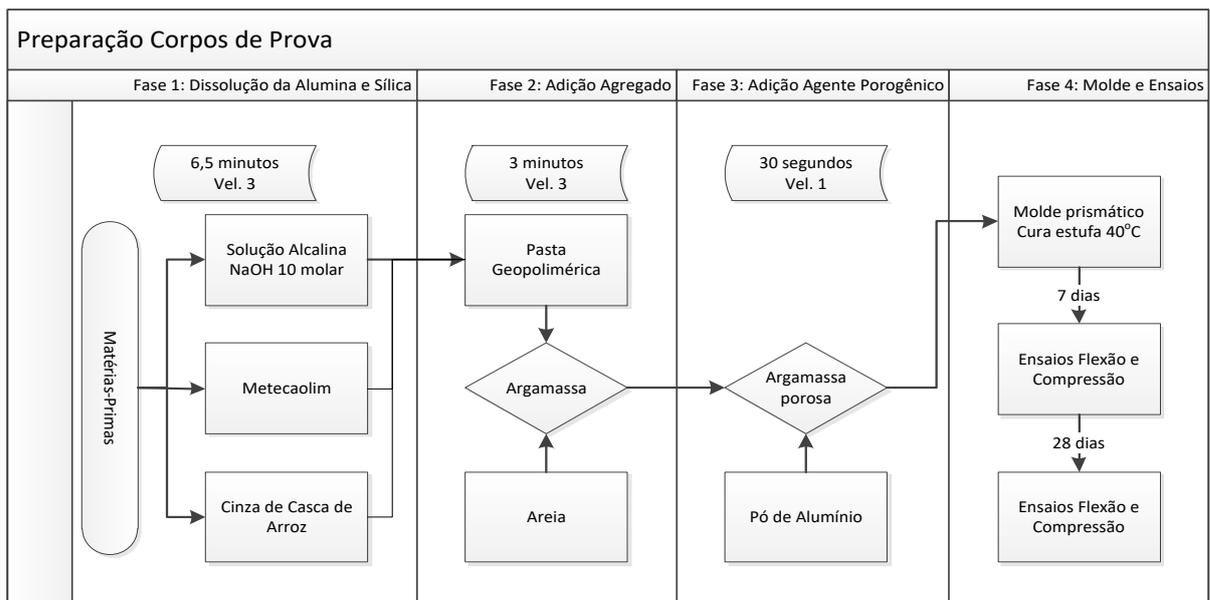
Tabela 6 – Relações calculadas para a argamassa de referência

RELAÇÕES INDICADAS PARA ARGAMASSA DE REFERÊNCIA			
Na ₂ O/SiO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Na ₂ O/Al ₂ O ₃	H ₂ O/Na ₂ O
0,35	4,56	1,59	10

Fonte: Autor, 2016

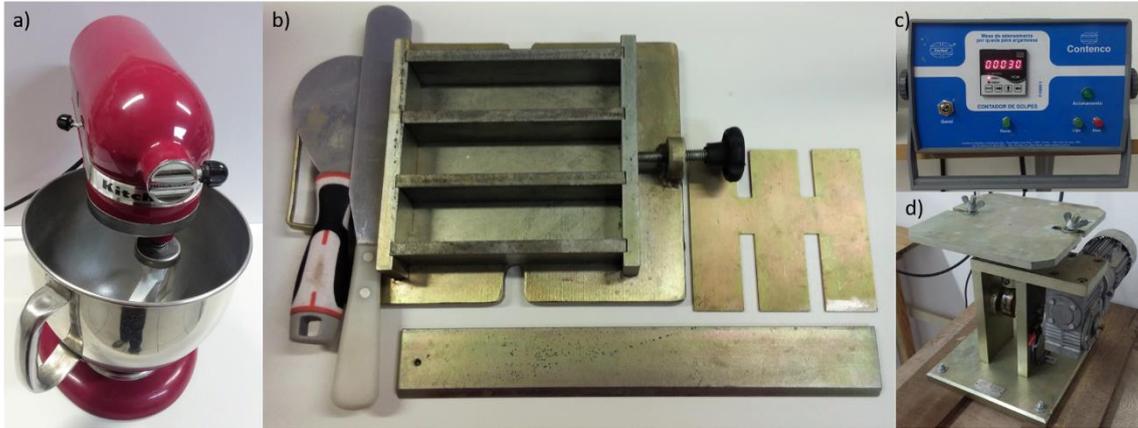
O procedimento para produção dos corpos de prova seguiu o roteiro apresentado pelo fluxograma descrito na Figura 15. A argamassa foi misturada em um misturador mecânico. O tempo total de mistura foi de 10 minutos, sendo o maior período a fase de dissolução dos materiais ricos em alumina e sílica. A confecção dos corpos de prova foi executada de acordo com a norma NBR 13279. A Figura 16 ilustra os equipamentos utilizados neste processo.

Figura 15 – Fluxograma de elaboração dos corpos de prova



Fonte: Autor, 2016

Figura 16 – Equipamentos utilizados na preparação da argamassa geopolimérica porosa – a) misturador intensivo, b) espátulas e moldes, c) contador de golpes, d) mesa de adensamento



Fonte: Autor, 2016

É importante ressaltar que apenas as amostras de referência foram adensadas conforme a NBR 13279. Como a intenção do trabalho é a de formar poros, o processo de adensamento acaba causando a eliminação parcial/total dos mesmos.

Para a confecção dos corpos de prova porosos a abordagem é diferenciada. Imediatamente após a mistura ser preparada no misturador, a argamassa é disposta de maneira uniforme nos moldes. Um tempo de aproximadamente 30 minutos é dado para que o processo de formação de bolhas ocorra livremente. O tempo de espera também tem o objetivo de proporcionar um ganho de rigidez nas amostras. Passados os 30 minutos, as amostras são conformadas e deixadas curando em temperatura ambiente (*Figura 17*).

Somente após a desmoldagem, ocorrida após 24h, as amostras são levadas a estufa para serem curadas a temperatura de 40°C.

Figura 17 – a) Argamassa despejada no molde imediatamente após a produção, b) 20 minutos após moldagem, c) Conformada 30 minutos após a moldagem



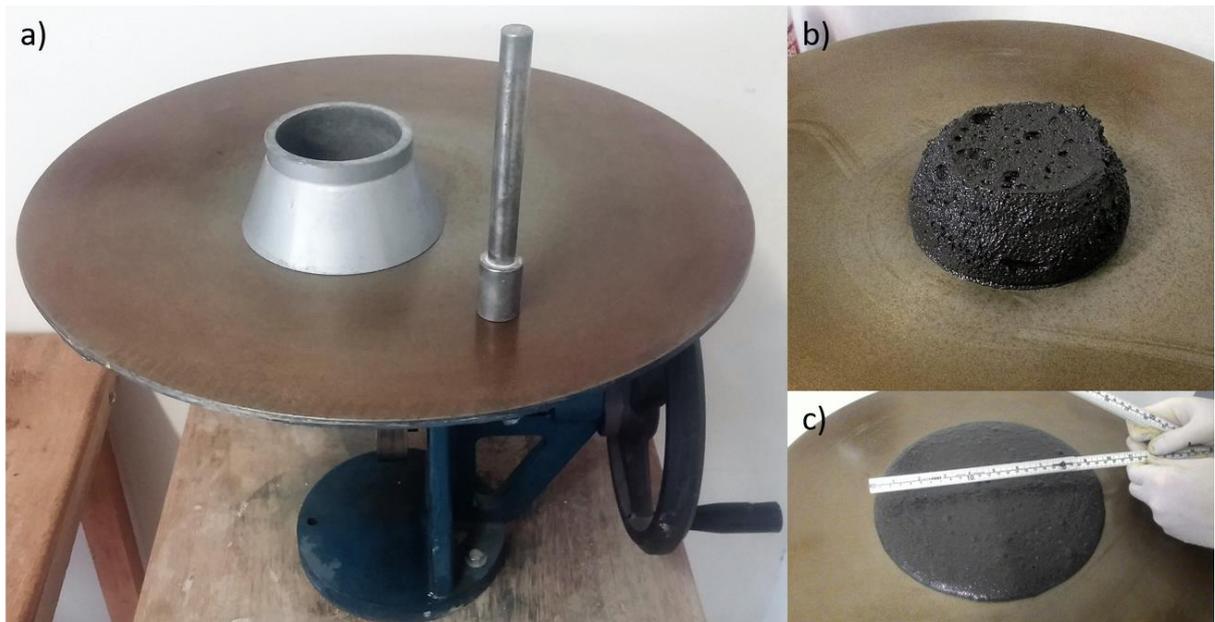
Fonte: Autor, 2016

3.2.2 Ensaios no estado Fresco

Ensaios no estado fresco tem a função de avaliar as argamassas quanto a sua consistência e plasticidade. O ensaio, mesa de consistência (flow table), especificado nas normas NBR7215 e NBR13276, foi utilizado no trabalho em dois momentos: primeiramente para a composição do traço de referência e em um segundo momento para identificar mudanças da viscosidade das argamassas geradas pela formação de bolhas provenientes do alumínio.

De acordo com a norma, o ensaio deve ser feito imediatamente após a preparação da mistura. O preenchimento do molde se dá em três etapas, utilizando um soquete para adensar a mistura com 15, 10 e 5 golpes. Após a preparação do corpo de prova, 30 batidas são desferidas com intervalo de 1 segundo entre cada batida. A *Figura 18* ilustra os equipamentos e o procedimento utilizados para a determinação do espalhamento.

Figura 18 – Detalhes ensaio de espalhamento – a) Aparelho para determinação da consistência da argamassa, b) Corpo de prova desmoldado, c) Corpo de prova após abatimento



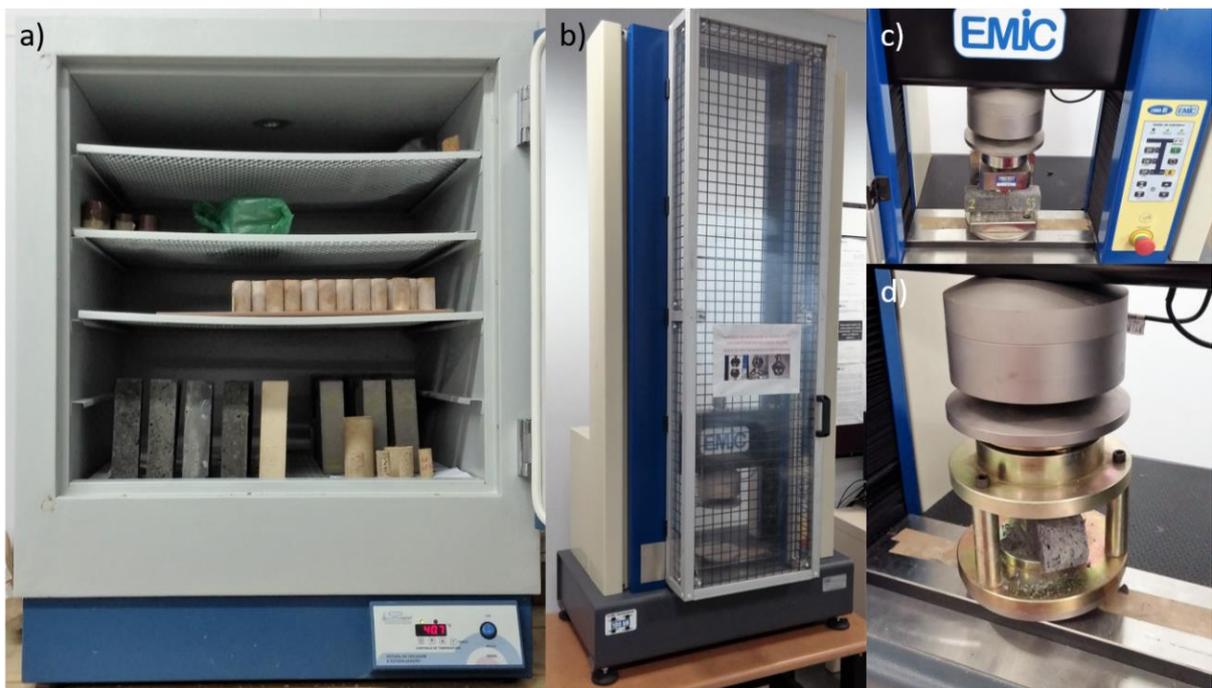
Fonte: Autor, 2016.

3.2.3 Ensaios no estado endurecido

Após a desmoldagem, os corpos de prova foram armazenados em estufa a $(40\pm 1)^\circ\text{C}$ até o período de rompimento. Foram efetuados ensaios de flexão e compressão para 7 e 28 dias.

O procedimento experimental foi conduzido no laboratório de resistência dos materiais do Centro Universitário Católica de Santa Catarina – Joinville. Todo o procedimento teve o acompanhamento do Instrutor de Laboratório de Eng. Civil, Robson Luiz Rosa. O experimento foi efetuado em uma máquina universal para ensaios mecânicos de tração, compressão, flexão de modelo EMIC 23-100, eletromecânica, microprocessada de marca INSTRON/EMIC. Suas principais características são: Capacidade: 100kN (10000kgf); Tipo: Dupla Coluna Autoportante e Acionamento através de fusos de esferas recirculantes pré-carregados com sistema de colunas guias cilíndricas (EMIC, 2016).

Figura 19 – Equipamentos utilizados nos ensaios no estado endurecido – a) Estufa, b) Máquina universal para ensaios mecânicos, c) Ensaio de flexão, d) Ensaio de compressão.



Fonte: Autor, 2016.

3.2.4 Propriedades físicas: absorção, densidade aparente e porosidade aberta

Os ensaios de caracterização física (densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta) foram realizados com 7 e 28 dias de cura de modo a inter-relacionar com os resultados da resistência à compressão e flexão. O método escolhido segue o princípio de Arquimedes e o mesmo foi adotado por Pennings e Grellner (1989) na caracterização de materiais porosos. Este consiste basicamente em:

- Secagem das amostras (temperatura de aproximadamente $(103\pm 1)^\circ\text{C}$ e pesagem em uma balança analítica com precisão de 0,01g: (m_s)
- Imersão dos corpos de prova em água por 72 horas, seguido da pesagem imersa (m_i)
- Pesagem da amostra após secagem de sua superfície (m_{sss})

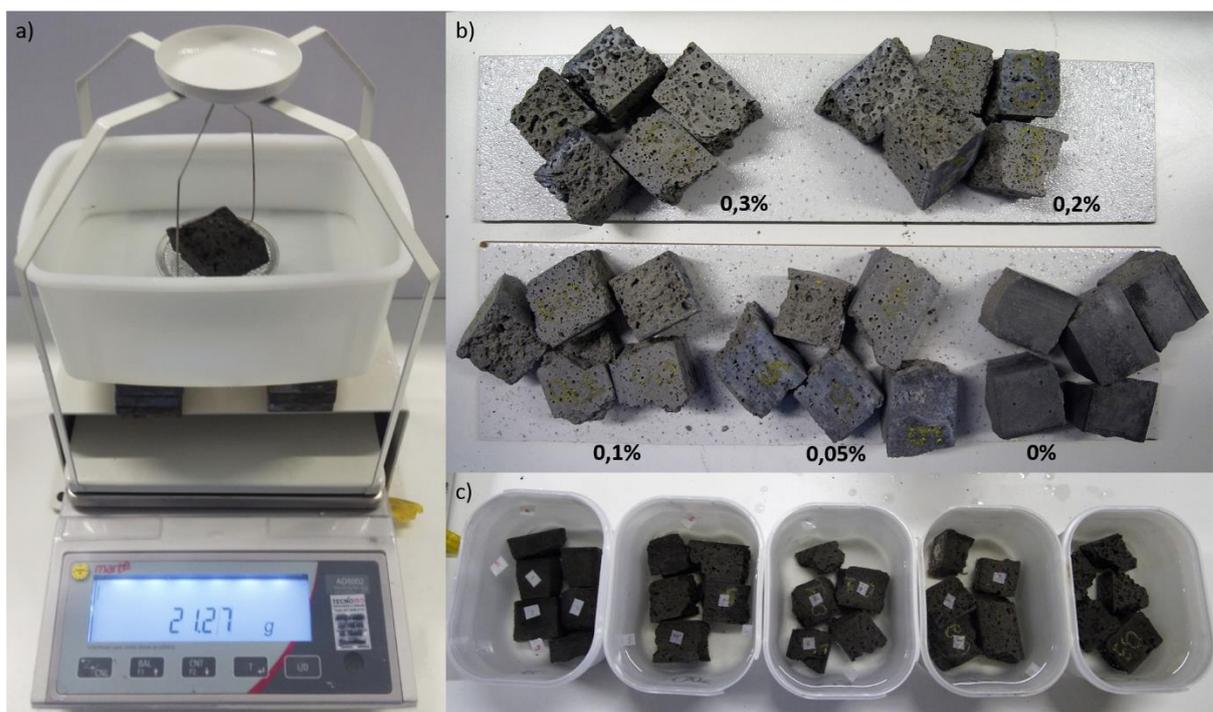
Onde:

m_s = massa seca

m_i = massa imersa

m_{sss} = massa saturada com superfície seca

Figura 20 – a) Equipamento para ensaio de Arquimedes, b) Corpos de prova após período de secagem, c) Corpos de prova imersos em água.



Fonte: Autor, 2016.

Após a coleta de todos os pesos, utilizando as equações Eq. 2, 3 e 4, é possível determinar a densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta das formulações.

$$\rho_{ap} = \frac{m_s}{m_{sss} - m_i} \quad \text{Eq. 2}$$

$$A_{H_2O} = \frac{m_{sss} - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Eq. 3}$$

$$P_{AB} = \frac{m_{sss} - m_s}{m_{sss} - m_i} \times 100 \quad \text{Eq. 4}$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados relativos a caracterização das matérias primas utilizadas, assim como ensaios e caracterizações realizadas para as 5 formulações de argamassas geopoliméricas.

4.1 Caracterização das Matérias Primas

A caracterização física do metacaulim apresentou um tamanho médio de partícula na ordem de 6,5 μm , sendo SiO_2 e Al_2O_3 os óxidos mais representativos da amostra (Tabela 2). Como esperado, o metacaulim é uma ótima fonte de aluminossilicatos. Com uma razão molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2,9$ indicando alumina em excesso, então o ideal é compor o mesmo com uma fonte extra de sílica.

Quanto ao ensaio de difração de raios-x identificou fases cristalinas como: caulinita (K), quartzo (Q) e mica (L). Estes componentes indicam que apesar da composição do metacaulim ter grandes proporções de alumina e sílica, nem toda a matriz encontra-se na forma amorfa (Figura 11). Outra característica importante é a área superficial, uma grande área superficial é indicativo de reatividade. De acordo com o estudo, o metacaulim possui área superficial de 32700 m^2/kg . Se comparado a área superficial do cimento Portland, o metacaulim tem uma área superficial aproximadamente 90 vezes maior.

Os ensaios obtidos com a cinza de casca de arroz apresentaram tamanho médio de partícula de 14,1 μm . A *Figura 12* mostra que a distribuição granulométrica da cinza é semelhante à do cimento Portland, porém sua área superficial é cerca de 57 vezes superior. Apesar da área superior ser muito maior que a do cimento Portland, a cinza de casca de arroz possui menor área que o metacaulim.

Ao contrário do metacaulim, a cinza de casca de arroz não possui Al_2O_3 em sua composição, porém é uma fonte extremamente rica de SiO_2 . Por si só a cinza não é capaz de formar aluminossilicatos, porém, em conjunto com o metacaulim até

melhora a composição química do produto. Isto é causado pelo crescimento da razão entre sílica e alumina.

Com isso, pode-se afirmar que a cinza de casca de arroz é um resíduo da agroindústria com um grande potencial para compor as formulações de geopolímeros. Estes fatores acabam reduzindo o custo além de proporcionar a valorização dos resíduos provenientes da biomassa. A Tabela 7 enumera diferentes composições que podem ser criadas levando em conta a razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Tabela 7 – Formulações com diferentes porcentagens de cinza de casca de arroz

Metacaulim	CCA	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
100%	0%	2,97
90%	10%	3,5
85%	15%	3,81
80%	20%	4,16
75%	25%	4,55
70%	30%	5,01
65%	35%	5,53
60%	40%	6,15

Relações indicadas como ideais

Fonte: Autor, 2016.

É importante ressaltar que valores correspondentes às razões ente Al e Si são só um indicativo, pois não tem-se ao certo a quantidade de sílica e alumina reativa presente nas matérias primas.

4.2 Caracterização do agente formador de poros

O alumínio escolhido para atuar como agente formador de poros passou por análise granulométrica tendo o tamanho médio de partícula de 257 μm . Levando em conta a densidade do alumínio, que é de 2600 kg/m^3 e o volume médio das partículas, em uma amostra de 0,1 gramas existem aproximadamente 2,92 bilhões de partículas.

Considerando que cada partícula pode ser responsável pela geração de 1 poro, estes valores levam a um valor substancial de poros.

Sabe-se que o tamanho da partícula tem relação direta com o tamanho dos poros, porém existem outros fatores relevantes para esta formação como trabalhabilidade da argamassa, a relação aglomerante/agregado e também a reologia da argamassa.

O tamanho da partícula também interfere no tempo em que a reação responsável pela formação dos poros fica ativa. No presente estudo, o pó de alumínio atuava até 20 minutos após a sua adição. Este dado foi coletado através da percepção

auditiva, provenientes da formação dos poros no interior da matriz geopolimérica (Figura 17).

4.3 Ensaios no estado fresco

O ensaio de consistência foi primeiramente usado para determinar o teor de água a ser usado pela argamassa de referência. Argamassas com 0% e 25% de cinza de casca de arroz foram elaboradas com intuito de determinar a quantidade de água a ser utilizada para um espalhamento inicial de 25 cm. Das análises efetuadas para a caracterização das matérias primas, tem-se que o metacaulim possui maior área superficial que a cinza. Este menor valor implica em uma menor absorção de água pela mistura.

Este fato foi percebido no momento de composição da argamassa de referência. Com a substituição de 25% do metacaulim por cinza de casca de arroz, a mistura consumiu 7% a menos de água para manter o mesmo índice de consistência.

Figura 21 – Ensaio de espalhamento para determinação da razão sólido/líquido a ser utilizada.

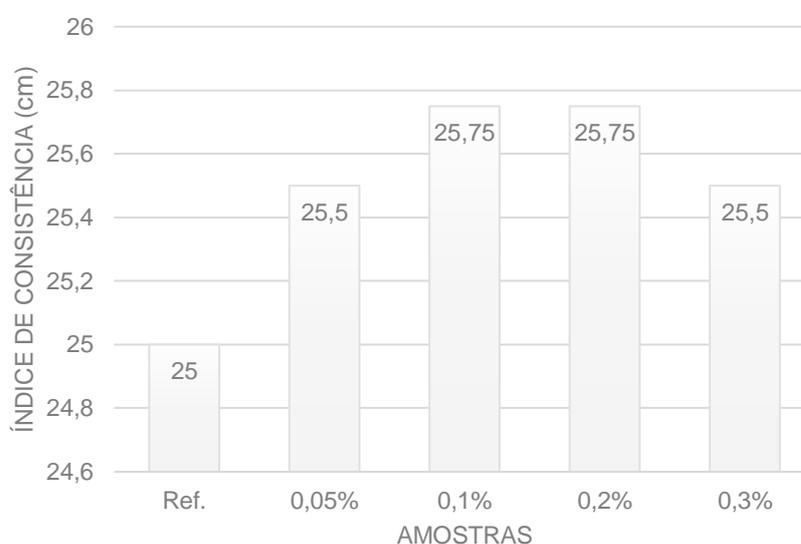


Fonte: Autor

Os valores do índice de consistência foram obtidos logo após a produção das amostras. A amostra referência foi ajustada previamente ao valor de 25 cm. Nota-se que a adição de pó de alumínio tem um efeito de aumento do espalhamento em todas as amostras. Esta redução da viscosidade causada pelo alumínio é explicada pela formação de bolhas no interior das amostras. Este fenômeno resulta em uma diminuição da interação entre as partículas sólidas e, conseqüentemente, a redução da viscosidade. (Novais, 2016)

O resultado também apresenta que existe um espalhamento máximo, que está entre 0,1% e 0,2% de alumínio, e que após estes índices, as amostras ganham consistência e acabam reduzindo o valor do espalhamento. Uma das explicações para esta tendência é que a reação entre o NaOH e o Al é uma reação exotérmica, portanto despende energia em forma de calor para o meio. Com esta energia adicional, pode-se ter uma evaporação prematura da água e com isso a argamassa ganha consistência. Outro fenômeno que é acelerado com a temperatura é a precipitação do N-A-S-H e, conseqüentemente, a viscosidade da amostra é aumentada.

Figura 22 – Resultado do ensaio de espalhamento para as 5 amostras



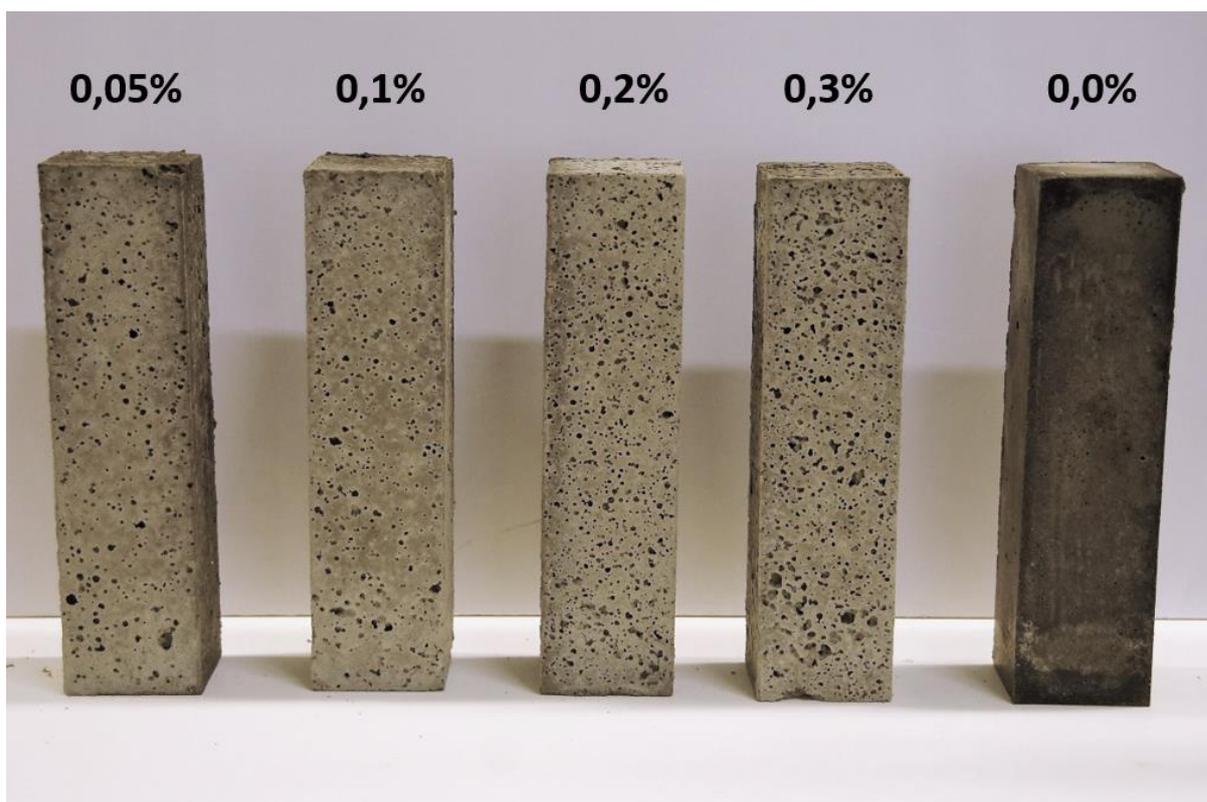
Fonte: Autor

4.4 Análise morfológica

Devido à escala dos poros formados ser milimétrica, as imagens das argamassas foram obtidas por câmera de alta resolução. Com isto pode-se fazer melhor análise do tamanho e disposição das bolhas. Fotos das formulações foram obtidas com as amostras de 7 e 28 dias.

A Figura 23 ilustra as cinco formulações contendo diferentes quantidades de pó de alumínio. É visível a diferença entre as diversas formulações. A amostra REF é constituída de uma matriz sólida, enquanto que as demais amostras, possuem uma grande porosidade aparente.

Figura 23 – Corpos de prova prismáticos com formulações de 0 a 0,3% de pó de alumínio



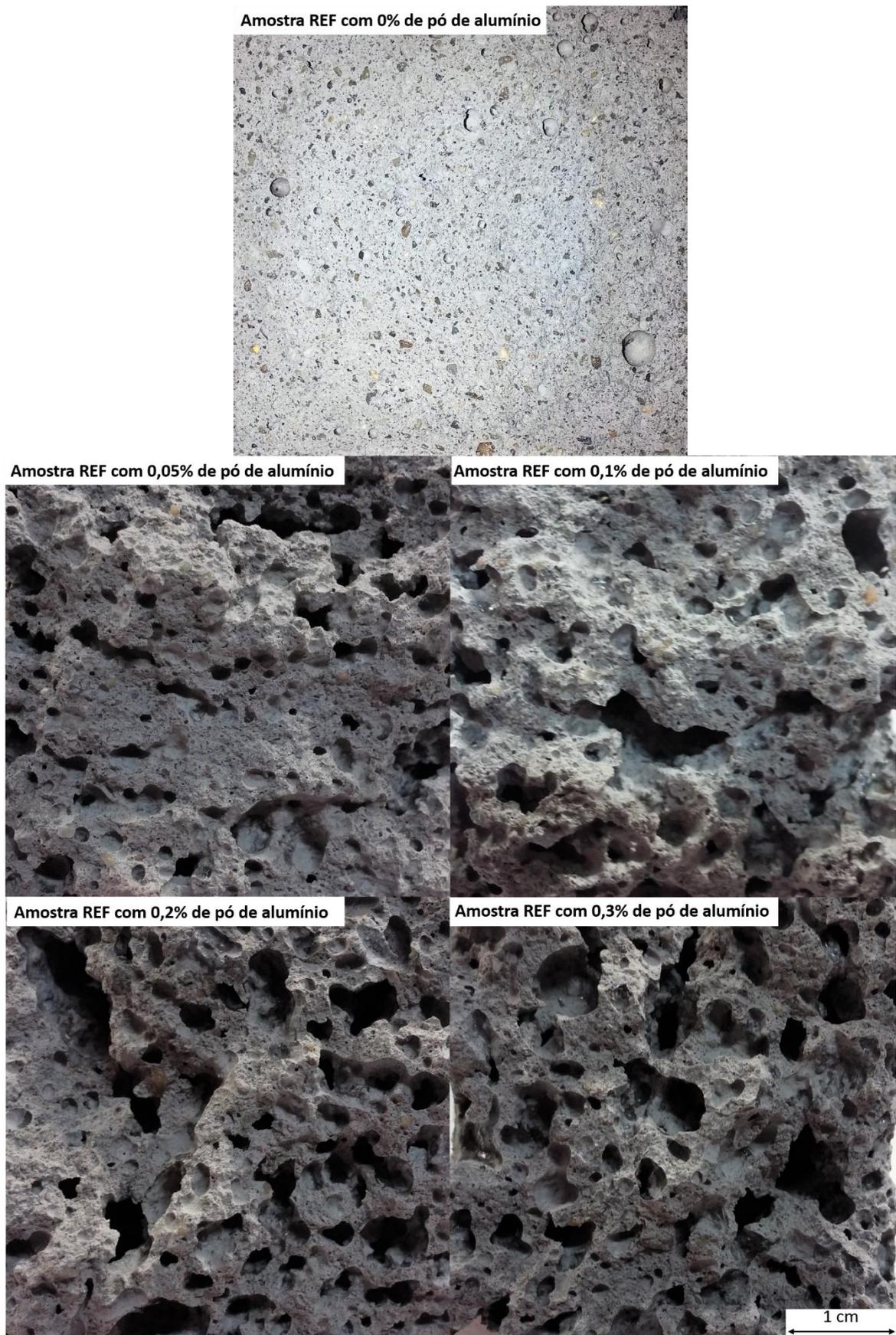
Fonte: Autor

A Figura 24 mostra o interior dos corpos de prova. Como esperado, a quantidade de agente porogênico influencia no número, volume e tamanho dos poros gerados.

A medida que eleva-se a proporção de pó de alumínio na argamassa, nota-se uma maior quantidade de poros conectados. As amostras com 0,05 e 0,1% apresentam mais áreas sólidas, com a ausência de poros. Este fator pode ser determinante na capacidade de resistência das argamassas.

Todas as formulações apresentaram uma boa distribuição dos poros ao longo da matriz. Isto indica que o processo de adição das partículas de alumínio na argamassa foi bem-sucedido.

Figura 24 – Caracterização ótica das argamassas geopoliméricas com 0, 0,05, 0,1, 0,2, 0,3% de pó de alumínio 28 dias de cura.



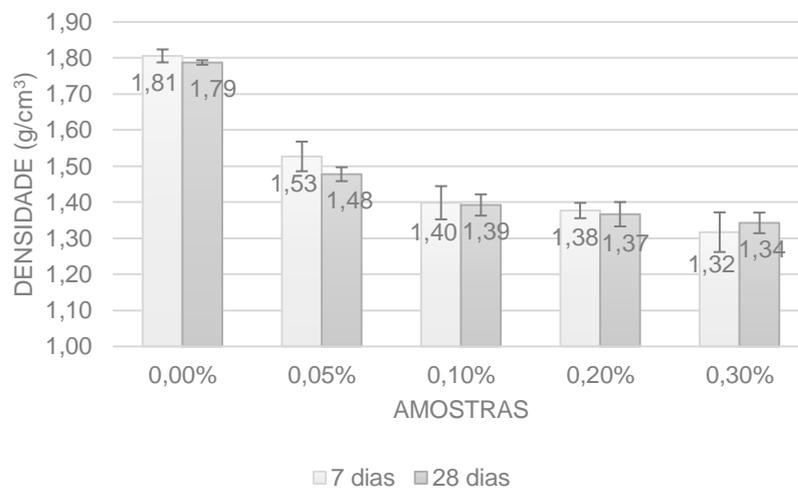
Fonte: Autor

4.5 Propriedades físicas: absorção, densidade aparente e porosidade aberta

Os resultados de densidade aparente (

Figura 25) decrescem a medida que a quantidade de pó de alumínio aumenta de proporção. A maior densidade obtida foi nas amostras de REF, sem pó de alumínio obtendo $1,806 \text{ g/cm}^3$ e $1,788 \text{ g/cm}^3$ com 7 e 28 dias respectivamente. As amostras com 0,3% de pó de alumínio obtiveram as menores densidades com $1,343 \text{ g/cm}^3$ e $1,317 \text{ g/cm}^3$ para 7 e 28 dias respectivamente.

Figura 25 – Densidade aparente das argamassas geopoliméricas com 7 e 28 dias

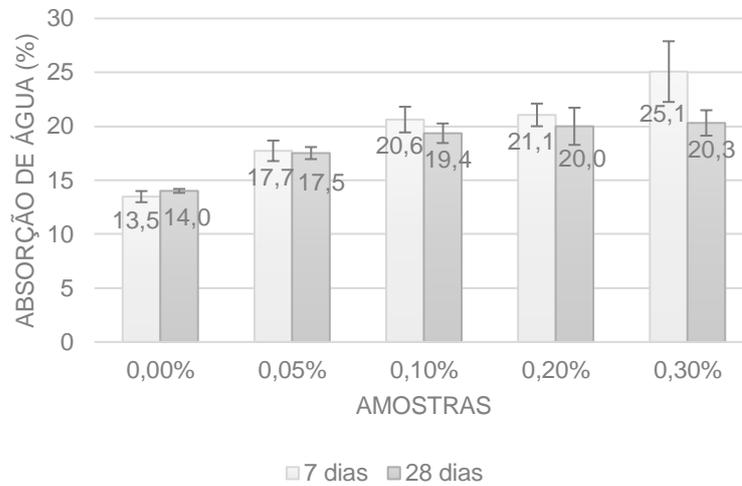


Fonte: Autor

Os resultados podem ser aproximados de uma função de potência variando com mais intensidade inicialmente e tendendo a se estabilizar nas frações maiores. Considerando o desvio padrão dos resultados obtidos nos ensaios, pode-se afirmar que a densidade do material não variou no intervalo de tempo entre os ensaios.

A absorção de água (Figura 26) apresentou um comportamento inverso ao da densidade aparente, no qual as amostras com maior teor de pó de alumínio resultaram em maior valor de absorção de água. O interessante neste gráfico está na diferença, principalmente nas amostras mais porosas, entre o percentual de absorção de 7 para 28 dias. O que pode explicar este fato é que a geopolimerização não está completa aos 7 dias e, conseqüentemente, a matriz analisada é muito mais suscetível a absorção de água, pois possui maior número de poros abertos. O fato das amostras menos densas terem maior diferença também está no fato da água ter maior acesso aos poros.

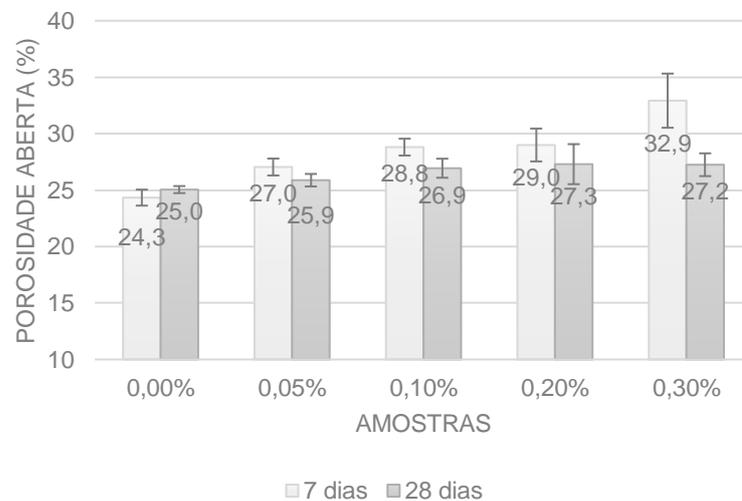
Figura 26 – Absorção de água das argamassas geopoliméricas com 7 e 28 dias



Fonte: Autor, 2016.

Os resultados encontrados na porosidade aberta (Figura 27), assim como os encontrados na absorção de água, foram inversos à densidade aparente. Eles seguiram a mesma tendência dos resultados de absorção e obtiveram uma maior distância entre os valores de 7 e 28 dias. Com a geopolimerização das argamassas mais completa aos 28 dias, estas amostras possuem uma maior quantidade de poros em que a água não consegue infiltrar, gerando assim, uma matriz mais coesa.

Figura 27 – Porosidade aberta das argamassas geopoliméricas com 7 e 28 dias de cura



Fonte – Autor, 2016.

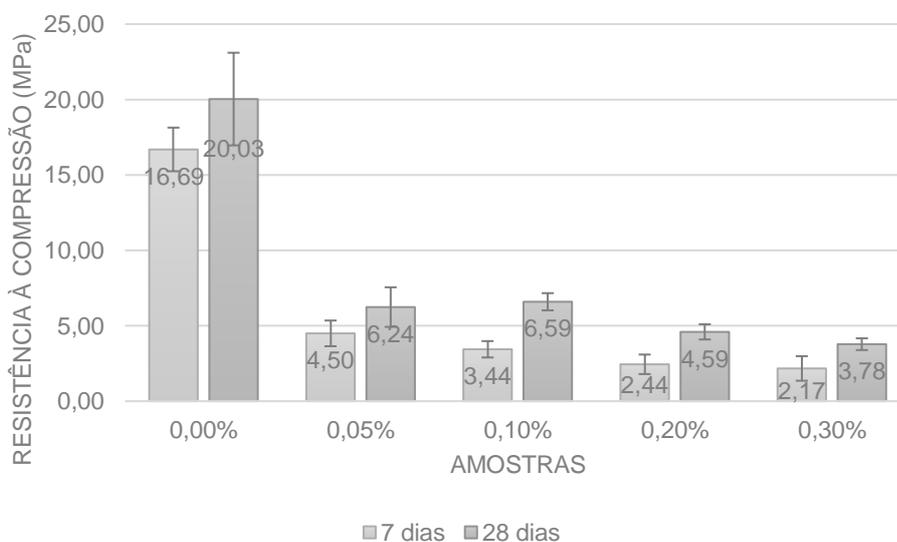
4.6 Resistência à compressão

Os valores de resistência a compressão (*Figura 28*) foram obtidos após 7 e 28 dias de cura, representando o valor médio de 5 corpos de prova. Após os ensaios de resistência a compressão, nota-se claramente que o geopolímero é um material frágil e seu comportamento é característico do mundo das cerâmicas, assim como as argamassas e concretos convencionais. Como previsto, as amostras de referência obtiveram o maior valor de resistência, obtendo 16,69 MPa e 20,3 MPa de média aos 7 e 28 dias, respectivamente. As amostras com 0,3 % obtiveram os menores valores.

Os resultados mostram primeiramente uma disparidade em relação à REF e as amostras porosas, sendo em relação as amostras com menor fração de alumínio 3,2 e 3,7 vezes maior a resistência à compressão para 7 e 28 dias respectivamente. Ao relacionar os valores de compressão com densidade aparente (*Figura 29*) nota-se um comportamento exponencial.

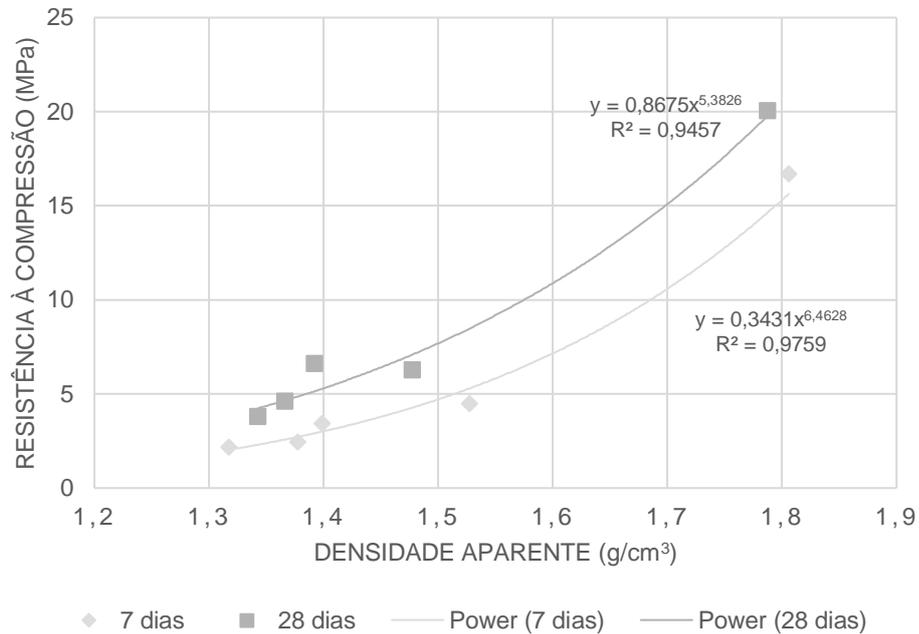
A resistência de um material é dada pela fórmula $\sigma = F/A$, com isso temos que a tensão resistida pelo material é inversamente proporcional a área. A formação de poros no interior da matriz reduz a área que efetivamente resiste às cargas aplicadas. O resultado deste comportamento, é de que a medida que se aumente a quantidade de poros, o material tenha menor resistência.

Figura 28 – Resistência à compressão de geopolímeros com 7 e 28 dias de cura.



Fonte: Autor, 2016.

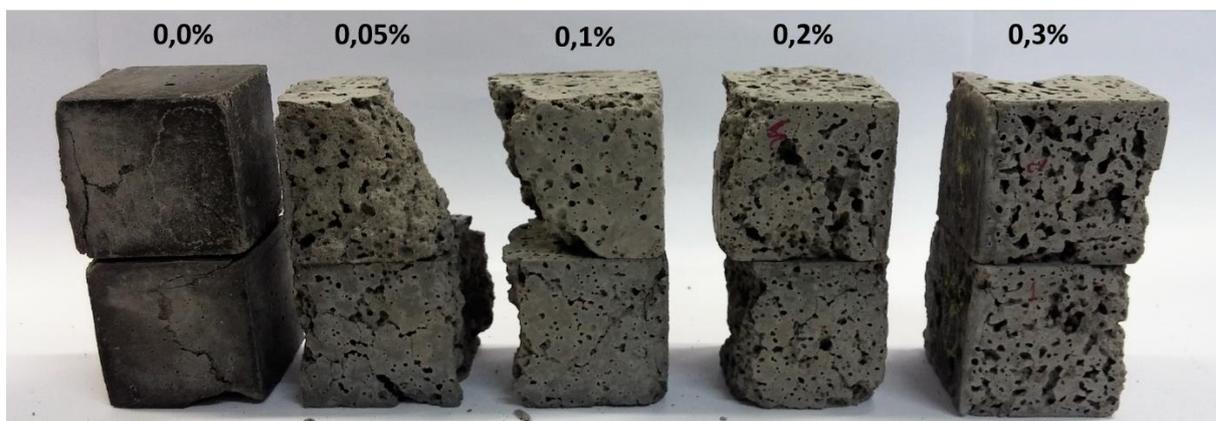
Figura 29 – Gráfico comparativo compressão/densidade aos 7 e 28 dias



Fonte: Autor, 2016.

Outra peculiaridade observada se refere a formação dos poros na matriz. A matriz porosa é mais heterogênea que a matriz de referência. Além disso, os poros formados na matriz não são perfeitamente esféricos, causando pontos de concentração de tensões nas amostras. Outro fator observado nas amostras com maior teor de alumínio é a coalescência de poros. Estes fatores também explicam a queda na resistência das amostras porosas em relação à REF.

Figura 30 – Corpos de prova após ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.



Fonte: Autor, 2016.

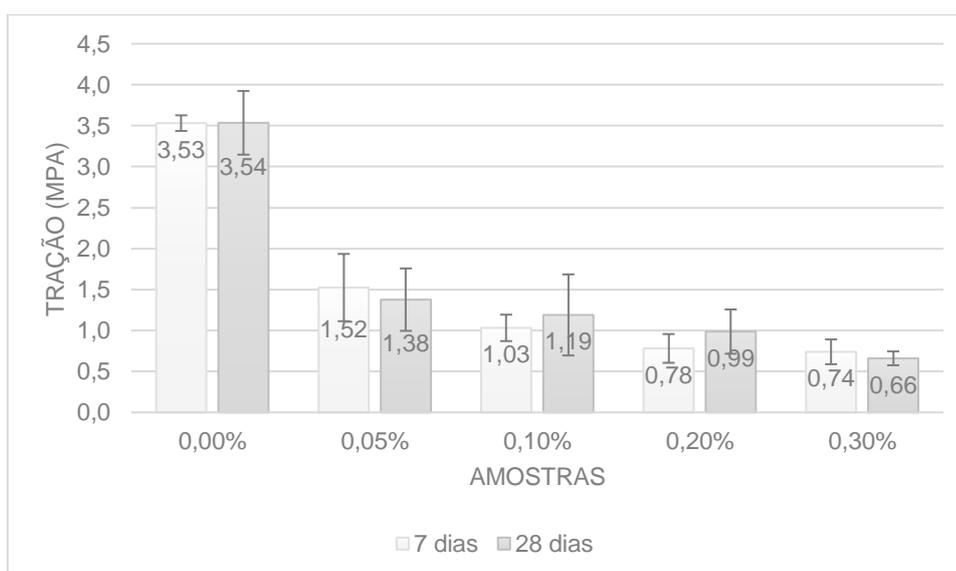
Na *Figura 30* são apresentados alguns corpos de prova após serem submetidos ao ensaio de compressão. Nota-se que, apesar de serem mais heterogêneas as amostras porosas, as fissuras de todos os corpos de prova estão orientadas a mais ou menos 45°. Um aspecto marcante nas amostras porosas é o amassamento observado após a ruptura, causado este pela ocorrência de vazios presentes nas amostras.

Embora a resistência à compressão tenha reduzido substancialmente desde a menor fração de pó de alumínio, os resultados encontram-se em um bom patamar. Se compararmos com as resistências mínimas especificadas na norma NBR 13438, que diz respeito a blocos de concreto celular classe 45 autoclavado, a resistência média exigida é 4,5 MPa. Com estes dados chega-se à conclusão que as amostras com 0,05% até 0,2% estão com uma resistência superior às exigidas para concreto celular.

4.7 Resistência à flexão

Os valores de resistência à flexão (*Figura 31*) foram obtidos após 7 e 28 dias de cura, representando o valor médio de 3 corpos de prova. Como previsto, as amostras de referência obtiveram o maior valor de resistência, obtendo 3,53 MPa e 3,54 MPa de média aos 7 e 28 dias, respectivamente. As amostras com 0,3% novamente obtiveram os menores valores para tração na flexão.

Figura 31 – Resistência à tração de geopolímeros com 7 e 28 dias de cura.

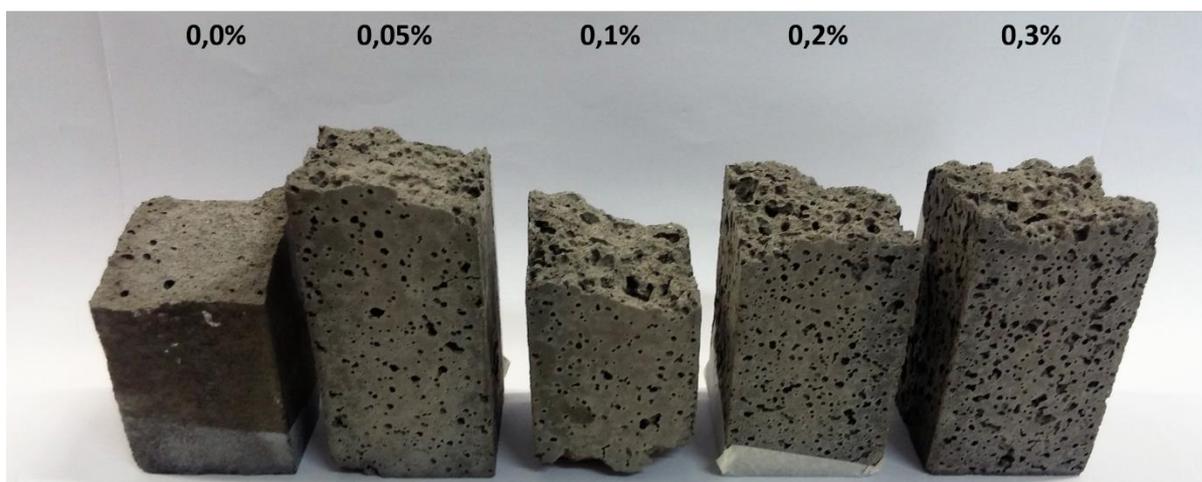


Fonte: Autor, 2016.

Ao comparar os resultados da tração com a compressão, nota-se que a disparidade entre a referência e os elementos porosos é menor. Outro fato interessante é que os valores de resistência à 7 e 28 dias são praticamente iguais. Como mostrado, a resistência a compressão cresceu de 7 para 28 dias, a explicação mais plausível para estes valores é que a medida que a argamassa geopolimérica vai avançando no tempo de cura, o material se torna mais frágil. Com isso acaba estagnando os valores de resistência a tração na flexão. É importante ressaltar que a resistência a tração na flexão de argamassas a base de cimento Portland são da ordem de $0,3 * \sqrt{f_{ck}}$. Por exemplo, para uma amostra de argamassa com resistência à compressão de 20 Mpa tem-se, aproximadamente, uma resistência a flexão de 1,34 Mpa. Portanto a resistência encontrada nas argamassas geopolimérica possuem valores maiores que o tradicional.

Assim como na compressão, o rompimento por flexão dos corpos de prova porosos normalmente não acontece perpendicular ao eixo. Este fato é devido as mesmas questões elencadas no item anterior (p. 46). A *Figura 32* mostra os corpos de prova rompidos por flexão. A imagem ilustra a heterogeneidade da superfície de ruptura, causada pelos poros de diferentes tamanhos e formatos.

Figura 32 – Corpos de prova após a ruptura por tração na flexão aos 28 dias.



Fonte: Autor, 2016.

5 CONCLUSÃO

Através do ensaio de espalhamento, observou-se que a medida que são acrescidas as frações de pó de alumínio nas amostras, a viscosidade diminui devido a redução do atrito interno entre as partículas. Ao mesmo tempo, a reação entre o alumínio e o NaOH é exotérmica. Consequentemente ocorre uma maior evaporação de água e a formação de N-A-S-H- é acelerada gerando um ganho de consistência das argamassas. Com estes fatores, a curva de espalhamento é aproximada a uma parábola, obtendo os maiores valores entre 0,1 e 0,2%.

Quanto as propriedades físicas, os resultados apontaram uma redução da densidade aparente à medida que aumentam as frações de pó de alumínio nas amostras. Ao contrário, os resultados de porosidade aberta e absorção de água apresentaram um aumento a medida que a fração de agente porogênico é acrescida. Apesar da densidade aparente ter se mantido estável entre as amostras de 7 e 28 dias confirmando os resultados da literatura.

Com isso podemos concluir que o pó de alumínio tem um grande impacto na densidade do material. Argamassas com 1300kg/m^3 foram produzidas mostrando o potencial destes materiais em aplicações que exigem baixo peso.

Os outros parâmetros, como absorção de água e porosidade aberta apresentaram uma redução. Conclui-se então que as amostras com maior tempo de cura possuem uma matriz mais sólida devido a uma maior geopolimerização das amostras. Como consequência disto, as amostras com maior tempo de cura possuem menor porosidade aberta e uma menor capacidade de absorção de água.

A resistência a compressão, como era de se esperar, reduz-se com a adição de pó de alumínio, porém observa-se uma maior resistência nas amostras de 0,05 e 0,1%. Ao analisarmos a morfologia das amostras notamos que nas amostras com 0,05 e 0,1% há uma maior ocorrência de regiões sólidas. Este fato explica a maior resistência à compressão destas amostras. Em relação ao tempo de cura, todas as amostras tiveram ganho entre o sétimo e o vigésimo oitavo dia de cura, apesar da maior parte da resistência ser obtida nas idades iniciais.

A resistência à flexão manteve o mesmo padrão da resistência à compressão. Diferentemente da resistência à compressão, as amostras de 7 e 28 dias de cura não apresentaram uma variação significativa.

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho de pesquisa, conclui-se que é possível utilizar pó de alumínio como agente formador de poros em argamassas geopoliméricas. As amostras até 0,2% apresentaram melhores resistências para a aplicação na construção civil. Além disso, todas as amostras possuem comportamento que permitem empregabilidade em diversas outras aplicações, como por exemplo agentes de controles de pH e agentes adsorventes de metais pesados.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Analisar a condutividade térmica das amostras
- Analisar o impacto da viscosidade na formação de poros
- Verificar resultados mecânicos em idades mais avançadas
- Variar a proporção de cinza de casca de arroz
- Caracterizar o tamanho e distribuição das bolhas
- Verificar a influência da granulometria do pó de alumínio na formação de bolhas

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653:** Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=331121>>. Acesso em 10 nov. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=361653>>. Acesso em 10 nov. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=3685>>. Acesso em 10 nov. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13438:** Blocos de Concreto Celular Autoclavado – Especificação. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=251984>>. Acesso em 10 nov. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15894:** Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=80623>>. Acesso em 10 nov. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7214:** Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=348035>>. Acesso em 10 nov. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997. Disponível em <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=4534>>. Acesso em 10 nov. 2016.

ASHIMA, M. M. **Producción y caracterización de materiales cementantes a partir del Silicoaluminato Cálcico Vítreo (VCAS)**. 2012. 454p. Tese (Doutorado) –

Programa de Doutorado em Engenharia Civil – Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, España, 2012.

Blissari, Eduardo Sitta et al. **Geopolímeros Obtidos a Partir de Cinzas de Carvão Mineral**. Grupo de Materiais Cerâmicos e Vítreos, UNESC. Santa Catarina, Brasil, 2014.

Castaldelli, V. Nobre. **Estudo de Geopolímeros Utilizando Cinzas Residuais do Bagaço de Cana-de-Açúcar**. 2013. 87 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista – Unesp, Ilha Solteira, SP. 2013.

CEMENT TECHNOLOGY ROADMAP 2009: Carbon emissions reductions up to 2050. Paris, França: International Energy Agency (IEA): Conches-Geneva; Suíça: World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). 2009.

COLLATTO, D. et al. Utilização da Sílica da Casca De Arroz na Produção de Concreto Usinado em Central. **53º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**. 2011.

DAVIDOVITS, Joseph. Geopolymer Chemistry and Applications. 4 ed. Saint-Quentin: **Geopolymer Institute**, 2008.

DAVIDOVITS, Joseph. Webinar Spring 2016: Special Focus on “Geopolymer Cement”. 20/04/2016 **Geopolymer Institute**. Disponível em: <<http://www.geopolymer.org/conference/webinar/webinars-videos-collection/>> Acesso em: 08 maio 2016.

DUXSON, P et al. Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 2007.

GLUKHOVSKY, V. D. **Soil Silicate Articles and Structures**, Ucrânia, p. 156, 1967.

ILIĆ, Biljana R.; MITROVIĆ, Aleksandra A.; MILIČIĆ, Ljiljana R.. Thermal Treatment of Kaolin Clay to Obtain Metakaolin. **Institute for Testing of Materials**, Belgrado, Servia, 2010.

MACCARINI, H. **Desenvolvimento de geopolímero a partir do uso de metacaulim**. 2015. 59 f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina.

Marangon, E. et al. Atividade Pozolânica da Sílica da Casca de Arroz Produzida por Combustão em Leito Fluidizado. **55º Congresso Brasileiro Do Concreto**. 2013.

MUSSO, Simone et al. Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites. **Composites Science and Technology**. Torino, Itália, v. 69, p. 1985–1990, 2009.

NOVAIS, Rui M. et al. Porous biomass fly ash-based geopolymers with tailored thermal Conductivity. **Journal of Cleaner Production**. v. 119, p. 99–107, 2016a.

NOVAIS, Rui M. et al. Waste glass from end-of-life fluorescent lamps as raw material in geopolymers. **Waste Management**. v. 52, p. 245–255, 2016b.

PENNINGS ECM, GRELLNER W. **Precise nondestructive determination of density of porous ceramics**. J Am Ceram Soc 1989;72:1268–70.

RUBENSTEIN, Madeleine, Emissions from the Cement Industry. 9/05/2012. **Earth Institute** – Columbia University. Disponível em: <<http://blogs.ei.columbia.edu/2012/05/09/emissions-from-the-cement-industry/>>. Acesso em: 10 maio 2016.

Shi, C. et al. Classification and characteristics of alkali-activated cements. **FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN CHEMICALLY-ACTIVATED MATERIALS** (CAM'2010-China). Jinan, China, 2010.

Shi, C.; Fernández Jiménez, A.; Palomo, A.. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**. V. 41, p 750 – 763, 2011.

SILVA, S.P., **Balanço Mineral Brasileiro 2001 (Caulim)**, Belém: DNPM 5º DS/DNPM, 2001.

Singh, B. et al. Geopolymer concrete: A review of some recent developments. CSIR-**Central Building Research Institute**. Roorkee, India, p. 78-90, 2015.

WHAT IS A Geopolymer? Introduction. 17/08/2012 **Geopolymer Institute**. Disponível em: <<http://www.geopolymer.org/science/introduction>> Acesso em: 09 maio 2016.