

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

VILSON SCHWITZKY JUNIOR

DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS POROSAS A
PARTIR DO USO DE PÓ DE LÂMPADA FLUORESCENTE E PÓ DE ALUMÍNIO

Joinville

2017

VILSON SCHWITZKY JUNIOR

DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS A PARTIR DO USO
DE PÓ DE LÂMPADA FLUORESCENTE E PÓ DE ALUMÍNIO

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Infraestrutura, no curso de Engenharia de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Senff

Joinville

2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo seu imenso amor, graça, misericórdia e proteção durante toda a minha vida.

Aos meus pais por todo o incentivo, apoio, dedicação e compreensão durante os cinco anos de graduação.

À minha namorada por todo carinho, amor e alegria que me fizeram continuar firme em busca dos meus sonhos.

Ao Professor Dr. Luciano Senff por sua orientação sábia e extremamente dedicada, que me inspirou durante toda a realização deste trabalho.

Ao Núcleo de Pesquisas em Materiais Cerâmicos e Compósitos (CERMAT), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

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

À empresa Apliquim Brasil Recycle pela doação de matérias primas essenciais para a realização deste trabalho.

A toda minha família e amigos que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos.

RESUMO

Inseridos num contexto de desenvolvimento sustentável, os países buscam constantemente, alternativas para reduzir os impactos ambientais causados pela construção civil, especialmente pela produção do cimento Portland, uma vez que esta é a principal causa das emissões de CO₂ na atmosfera. Dentre estas alternativas, destacam-se os materiais geopoliméricos, que são materiais que quando submetidos à soluções alcalinas, endurecem devido à polimerização. As matérias primas para a produção dos geopolímeros são de composições ricas em sílica e alumina. Nesta pesquisa, será utilizado o metacaulim como fonte principal de aluminossilicato e da mesma forma, pó de lâmpadas fluorescentes recicladas será parcialmente aplicado na composição com o mesmo intuito do metacaulim, enquanto que, a adição do pó de alumínio tem a função de um agente formador de poros. A solução ativadora alcalina será composta pelo hidróxido de sódio com concentração de 10 molar e o silicato de sódio. Os resultados demonstram que o pó de alumínio e o seu efeito, quando combinado com o pó de lâmpada fluorescente contém influência direta na porosidade, consistência, densidade e resistência mecânica. Assim, argamassas geopoliméricas porosas foram produzidas e valores de resistência à compressão aos 28 dias de curas alcançaram 13 MPa, mostrando que o pó de alumínio e o pó de lâmpada fluorescente podem ser utilizados em aplicações que requeiram materiais leves, reguladores de pH e absorventes de metais pesados.

Palavras-Chave: Cimento Portland, Geopolímeros, Metacaulim, Pó de lâmpada fluorescente, Pó de alumínio.

ABSTRACT

Inserted in a context of sustainable development, countries are constantly seeking alternatives to reduce the environmental impacts caused by construction, especially by the production of Portland cement, once this is the main cause of CO₂ emissions in the atmosphere. Among these alternatives, the geopolymeric materials stand out, which are materials that, when subjected to alkaline solutions, harden due to polymerization. The raw material for the production of the geopolymers is compositions rich in silica and alumina. In this research, metakaolin will be used as the main source of aluminosilicate and in the same way, recycled fluorescent lamp powder will be partially applied in the composition with the same purpose of metakaolin, whereas the addition of aluminum powder has the function of a pores forming agent. The alkaline activating solution will be composed of 10M sodium hydroxide and sodium silicate. The results demonstrate that aluminum powder and its effect combined with fluorescent lamp powder has a direct influence on porosity, consistency, density and mechanical strength. Porous geopolymeric mortars were produced and compressive strength values at 28 days of cures reached 13 MPa, showing that aluminum powder and fluorescent lamp powder can be used in applications requiring light materials, pH regulators and heavy metal absorbers.

Keywords: Portland cement, Geopolymers, Metakaolin, Fluorescent lamp powder, Aluminum powder.

SUMÁRIO

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 1.1. | Objetivos..... | 13 |
| 1.1.1. | Objetivo Geral..... | 13 |
| 1.1.2. | Objetivos específicos..... | 13 |
| 2. | REFERENCIAL TEÓRICO..... | 14 |
| 2.1. | Geopolímeros..... | 14 |
| 2.2. | Metacaulim..... | 16 |
| 2.3. | Ativadores..... | 18 |
| 2.4. | Lâmpadas Fluorescentes..... | 20 |
| 2.5. | Aplicações na construção civil..... | 22 |
| 2.6. | Geopolímeros Leves..... | 23 |
| 3. | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 25 |
| 3.1. | Materiais..... | 26 |
| 3.2. | Metodologia Experimental..... | 32 |
| 3.2.1. | Definição e produção das amostras..... | 32 |
| 3.2.2. | Ensaio no estado fresco..... | 36 |
| 3.2.3. | Ensaio no estado endurecido..... | 37 |
| 3.2.4. | Propriedades físicas: absorção, densidade aparente e porosidade aberta..... | 38 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 39 |
| 4.1. | Caracterização das matérias primas..... | 40 |
| 4.2. | Caracterização do agente formador de poros..... | 41 |
| 4.3. | Ensaio no estado fresco..... | 42 |
| 4.4. | Análise morfológica..... | 44 |
| 4.5. | Propriedades físicas: absorção, densidade aparente e porosidade aberta..... | 47 |
| 4.6. | Resistência à compressão..... | 50 |
| 4.7. | Resistência à flexão..... | 54 |
| 5. | CONCLUSÃO..... | 56 |
| 5.1. | Sugestões para trabalhos futuros..... | 57 |
| | REFERÊNCIAS..... | 58 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Representação esquemática dos polissialatos. | 15 |
| Figura 2 - Representação esquemática dos polissialatos. | 16 |
| Figura 3 - Amostras comerciais de metacaulim..... | 18 |
| Figura 4 - Aplicação dos geopolímeros na construção civil..... | 23 |
| Figura 5 - Trabalhos publicados sobre geopolímeros e geopolímeros leves. | 24 |
| Figura 6 - Ensaio para caracterização de argamassas. | 25 |
| Figura 7 - Matérias primas utilizadas na produção de argamassas geopoliméricas: a) Areia média, Metacaulim, PA, PLF; b) Solução NaOH (10 M); c) Silicato de sódio. . | 27 |
| Figura 8 – a) Distribuição do tamanho de partículas do metacaulim ; b) Difração de raios-X do metacaulim..... | 28 |
| Figura 9 - Difração de raios-X PLF..... | 29 |
| Figura 10 - a) Composição granulométrica da areia; b) Peneirador vibratório. | 31 |
| Figura 11 - a) Distribuição granulométrica do pó de alumínio; b) Amostra de pó de alumínio..... | 32 |
| Figura 12- Fluxograma produção das argamassas geopoliméricas..... | 34 |
| Figura 13 - Equipamentos utilizados para a produção de argamassa: a) misturador mecânico, b) espátulas e moldes, c) agitador magnético, d) balança de precisão.... | 34 |
| Figura 14 – Corpos de prova em processo de cura. | 35 |
| Figura 15 - Ensaio de mesa (Flow Table). | 36 |
| Figura 16 - Equipamentos para ensaio em estado endurecido – a) Estufa, b) Máquina universal para ensaios mecânicos, c) Ensaio de flexão, d) Ensaio de compressão..... | 37 |
| Figura 17 - Ensaio de Arquimedes..... | 39 |
| Figura 18 - Argamassas geopoliméricas porosas com 0,3% de PA..... | 42 |
| Figura 19 - Espalhamento inicial da argamassa de referência..... | 43 |
| Figura 20 – Valores do espalhamento de todas as argamassas geopoliméricas..... | 44 |
| Figura 21 - Amostras prismáticas com diferentes teores de PLF e PA. | 45 |
| Figura 22 - Caracterização óptica das argamassas a 28 dias de cura..... | 46 |
| Figura 23 - Absorção de água das argamassas geopoliméricas com 28 dias de cura. | 47 |
| Figura 24 - Densidade aparente das argamassas geopoliméricas com 28 dias de cura. | 48 |

| | |
|--|----|
| Figura 25 - Relação entre densidade aparente e absorção de água das amostras aos 28 dias de cura..... | 49 |
| Figura 26 - Porosidade aparente das argamassas geopoliméricas aos 28 dias de cura. | 50 |
| Figura 27 - Resistência à compressão das argamassas geopoliméricas aos 28 dias de cura. | 51 |
| Figura 28 - Relação entre resistência à compressão e densidade aparente das argamassas geopoliméricas aos 28 dias de cura..... | 52 |
| Figura 29 - Relação entre resistência à compressão e absorção de água das argamassas geopoliméricas aos 28 dias de cura..... | 52 |
| Figura 30 - Corpos de prova após o ensaio de resistência à compressão. | 53 |
| Figura 31 - Resultado de resistência à flexão das argamassas geopoliméricas aos 28 dias de cura..... | 54 |
| Figura 32 - Corpos de prova após o ensaio de resistência à flexão..... | 55 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1- Composição química da argila caulínica | 17 |
| Tabela 2 - Razões ideais para formulações de Geopolímeros | 19 |
| Tabela 3 - Composição química dos vidros e do metacaulim | 21 |
| Tabela 4 - Composição química do metacaulim..... | 28 |
| Tabela 5 - Composição química do PLF determinada por FRX | 29 |
| Tabela 6 - Características do hidróxido de sódio | 30 |
| Tabela 7 - Composição química do silicato de sódio | 30 |
| Tabela 8- Relações argamassa de referência..... | 33 |
| Tabela 9 - Formulações propostas..... | 33 |
| Tabela 10 - Formulações com diferentes quantidades de PLF | 41 |

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

DRX – Difração por raio-X

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 – Molar

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

PA – Pó de Alumínio

PLF – Pó de Lâmpada Fluorescente

P₂O₅ – Pentóxido de Fósforo

ppm – pontos por milhão

Q – Quartzo

REF. – Referência

S/L – Sólido/Líquido

Si – Silício

SiO₂ – Óxido de Silício (Sílica)

TiO₂ – Dióxido de Titânio

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

1. INTRODUÇÃO

As recentes mudanças climáticas e o aquecimento global são, provavelmente, as maiores preocupações deste século e estão conectadas diretamente com o aumento significativo na emissão de gases do efeito estufa. (NOVAIS, 2016). Um dos principais fatores responsáveis por estas emissões trata-se da produção do cimento Portland, matéria prima para a produção do concreto, que contribui com cerca de 5% do CO₂ produzido pelo homem anualmente (FONTA, 2013). Entretanto, trata-se do material da construção civil mais utilizado e representa um impacto significativo na economia do país (TORGAL et al., 2005).

Com o intuito de reduzir os impactos ambientais gerados pela produção do cimento Portland, as indústrias e o meio científico buscam alternativas para o desenvolvimento econômico sustentável. Criado por Davidovists em 1978, os geopolímeros têm se tornado uma solução inovadora e eficiente, visto que, seu comportamento assemelha-se ao cimento convencional e exigem menor energia para a sua produção.

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

Geopolímeros são cadeias ou redes de moléculas minerais ligadas por ligações covalentes e são obtidos sinteticamente, por meio da ativação alcalina de aluminossilicatos (DAVIDOVITS, 1991). Além das baixas emissões de carbono, suas principais características são: resistência ao ataque de ácidos, resistência à altas temperaturas, resistência ao gelo-degelo e boa trabalhabilidade (TORGAL, 2010).

Mesmo sendo considerada uma alternativa recente, os geopolímeros já possuem aplicação prática na construção civil mundial. Na Austrália, Canadá e Europa já são utilizados como dormentes de ferrovias, painéis pré-fabricados de edificações e obras de infraestrutura como o aeroporto de Brisbane West Wellcamp

Airport (BWWA), Toowoomba, Queensland, Austrália. (GEOPOLYMER, 2010). Aplicação para ambientes agressivos, reparos estruturais e contenção de resíduos tóxicos também estão sendo utilizados.

Diante disto, faz-se necessário um estudo detalhado das propriedades físicas e mecânicas dos geopolímeros, além da utilização de resíduos não somente como materiais alternativos ao cimento, mas também como adições em argamassas. A reutilização destes materiais contribui para a minimização dos impactos ambientais gerados por sua eliminação inadequada. Os resíduos empregados possuem diferentes características, dependentes da sua composição química, origem, e tamanho de partículas, que podem alterar a resistência, tempo de pega, trabalhabilidade e porosidade do material.

Neste contexto e com base nas vantagens do uso de geopolímeros, este trabalho concentra-se na elaboração de argamassas feitas a partir de metacaulim como fonte de aluminossilicato, substituição parcial com o pó de lâmpada fluorescente (PLF) e adição do pó de alumínio (PA) como agente formador de poros.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolvimento de argamassas geopoliméricas porosas a partir da substituição parcial do metacaulim pelo PLF e adição de pó de alumínio como agente formador de poros.

1.1.2. Objetivos específicos

Entre os objetivos específicos, pode-se citar:

- Análise do comportamento das argamassas geopoliméricas porosas no estado fresco, por meio do ensaio de consistência (*flow table*);
- Produção de corpos de prova para avaliar propriedades físicas (densidade aparente, porosidade aberta, absorção de água);

- Produção de corpos de prova para avaliar as propriedades mecânicas (resistência à compressão e flexão) para 28 dias de cura;
- Avaliação da relação entre as propriedades físicas e mecânicas das argamassas geopoliméricas aos 28 dias de cura.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo Davidovits (2008), os geopolímeros podem ser considerados como um novo cimento. No presente capítulo serão apresentadas as diversas definições sobre o material, bem como as matérias primas e ativadores utilizados para o seu desenvolvimento e suas aplicações na construção civil.

2.1. Geopolímeros

Os geopolímeros são polímeros inorgânicos cuja obtenção é caracterizada pela polimerização de matérias primas naturais de origem geológica contendo aluminossilicatos (PINTO, 2006). O termo geopolímero foi criado por Davidovits em 1978 para designar uma família de ligantes minerais com composição química comparável à das zeólitas, porém com uma microestrutura mista, ou seja, amorfa à semicristalina (SKAF, 2008, p. 23).

Por definição, as zeólitas são agrupamentos de aluminossilicatos ou de alcalinoterrosos caracterizados por uma elevada superfície interna de contato e enorme capacidade de permutação de íons (PINTO, 2004 apud DIAS, 2008).

Feng et al. (2012) definem geopolímeros como estruturas produzidas pela condensação de unidades tetraédricas de aluminossilicato, com íons de metais alcalinos que equilibram as cargas associadas às estruturas tetraédricas de alumínio.

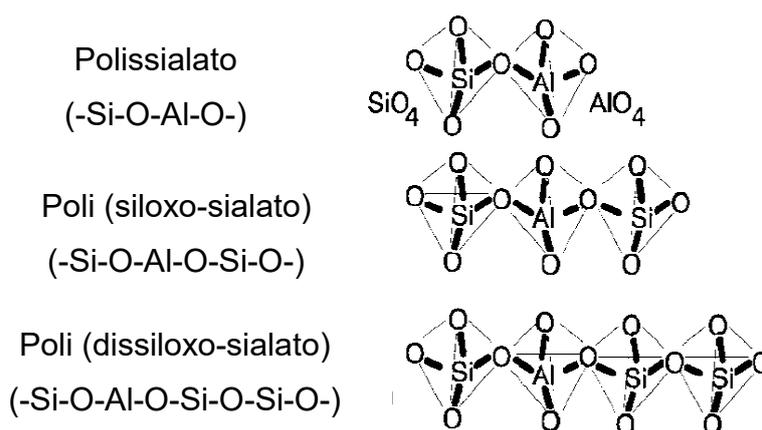
Segundo Vassalo (2013), convencionalmente, geopolímeros são sintetizados a partir de uma mistura constituída por uma solução alcalina (frequentemente silicato solúvel) e materiais sólidos de aluminossilicato. A geopolimerização ocorre em duas etapas, primeiramente ocorre a dissolução da sílica e da alumina que contém na

matéria prima a solução ativadora posteriormente ocorre a policondensação e endurecimento do resultado dessa dissolução formando uma estrutura geopolimérica.

Os polissilicatos, abreviatura de poli-silico-aluminatos são outra terminologia adotada para os geopolímeros. Segundo Davidovits (1976), polissilicato é um material de cadeia molecular constituída de silício, alumínio e oxigênio que apresenta estrutura amorfa à semicristalina. Vassalo (2013) relata que a estrutura dos polissilicatos representa polímeros naturais resultantes da reação chamada geo-síntese, ciência para produção de rocha artificial a temperatura abaixo de 100 °C com o objetivo de obter características naturais como dureza, durabilidade e estabilidade térmica. A reação de geo-síntese induz o alumínio por ativação alcalina em uma estrutura de matriz silicosa (SILVA, 2000).

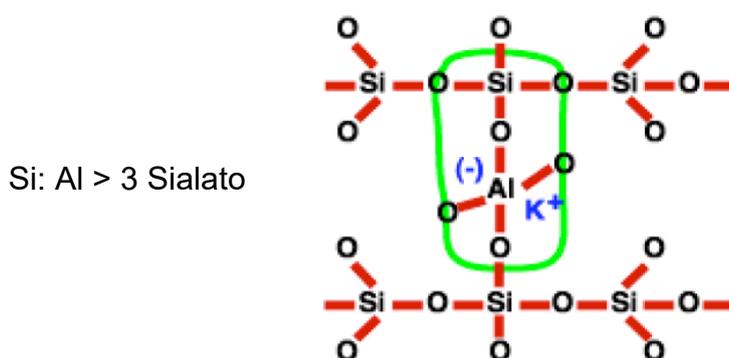
A representação dos arranjos tridimensionais é proporcionada pela razão entre os átomos de silício e alumínio, sendo eles classificados em três denominações: Poli (sialato) com razão Si/Al=1, Poli (sialato-siloxo) com razão Si/Al=2, e Poli (sialato-disiloxo) com razão Si/Al=3, conforme mostrado nas Figuras 1 e 2.

Figura 1 - Representação esquemática dos polissialatos.



Fonte: Davidovits (1994, p. 2).

Figura 2 - Representação esquemática dos polissialatos.



Fonte: Davidovits (1994, p. 2).

Vassalo (2013) obteve resultados sobre o efeito das proporções ideais de Si/Al aplicados nos geopolímeros produzidos por ativação alcalina do metacaulim, resultando em proporções de 1,5 a 2, sendo que, valores superiores a estes diminuiriam suas propriedades mecânicas.

2.2. Metacaulim

Segundo Rocha (2005), o metacaulim (MK) é um material predominantemente amorfo, ou seja, apresenta pouca ou nenhuma organização cristalina. Sua denominação precede do termo meta, que significa mudança e caulim, originado do termo chinês Kauling, ou colina alta que se refere a uma colina de Jauchau Fu, onde o material obtido é formado pela caulinita, apresentando cor branca ou quase branca devido ao baixo teor de ferro (SILVA, 1993).

Metacaulim é um material aluminossilicato termicamente ativado, com alta atividade pozolânica, gerado pela calcinação de argilas caulínicas em temperaturas entre 650°C a 800°C, dependendo da pureza e cristalinidade das argilas (LI et al. 2010). A matéria-prima básica para a fabricação do metacaulim de alta reatividade é o caulim de alta qualidade, com baixos teores de impurezas. De acordo com o Balanço Mineral Brasileiro (2001) apud Pinto (2007), o caulim provavelmente está entre os seis minerais mais abundantes do topo da crosta terrestre, sendo considerado um dos mais importantes.

A composição química dos caulins aproxima-se de $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, o que corresponde a cerca de 45,54% de SiO_2 , 39,50% de Al_2O_3 , 13,96% de H_2O e outros elementos em menor quantidades (MONTE et al. 2003). O Caulim é obtido através do beneficiamento de argilas cauliníticas, cujos teores de caulim, em geral, situam-se acima de 50 % (ROCHA, 2005). A composição química da argila caulinítica e do caulim estão apresentadas na Tabela 1.

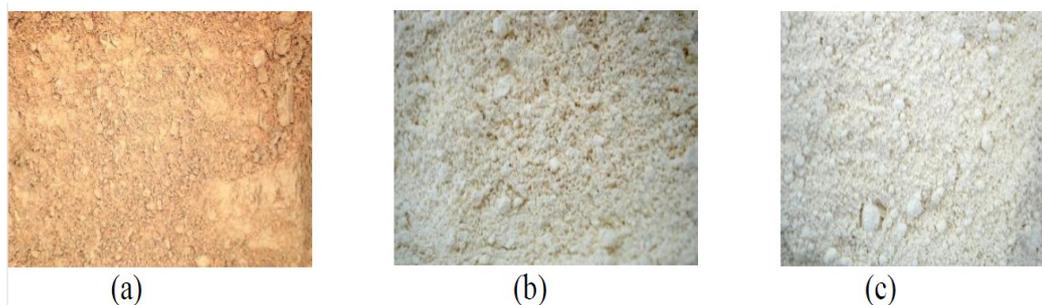
Tabela 1- Composição química da argila caulinítica.

| Composto | Argila Caulinítica Típica | Caulim Teórico |
|--|----------------------------------|-----------------------|
| SiO_2 | >40,0% e <60,0% | 46,54% |
| Al_2O_3 | >25,0% e <45,0% | 39,50% |
| FeO_3 | <0,8% | - |
| Na_2O | <0,1% | - |
| K_2O | <3,0% | - |
| TiO_2 | <1,0% | - |
| CaO | <1,0% | - |
| H_2O | >8,0% e <18,0% | 13,96% |
| Outros | <1,0% | - |
| Relação $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ | - | - |

Fonte: Netto (2006, p. 87).

Segundo Davidovits (1994), com a transformação do caulim em metacaulim, o material se torna muito mais reativo, com propriedades pozolânicas. Além disso, o produto obtido pode ter diferentes graus de finura, superfície específica e também apresentar colorações variadas. Essas características dependem da composição química e mineralógica do caulim de base. (VASSALO, 2013). Na Figura 3 são mostrados três diferentes amostras de metacaulim produzidos por três empresas diferentes: Metacaulim do Brasil (a), Advanced Cement Technologies (b) e Engelhard (c), sucessivamente.

Figura 3 - Amostras comerciais de metacaulim.



Fonte: Rocha e Vasconcellos (2006, p. 101).

Segundo Rocha e Vasconcelos (2006), os teores de silício e alumínio variam de 52 a 58% e 34 a 39%, respectivamente para as três amostras. A aplicação das fontes de metacaulim nos geopolímeros varia em tamanho de partícula, pureza e cristalinidade da origem caulinita, embora, quando adicionadas à mistura, a dispersão dessas partículas afeta muito pouco o grau de reação álcali-ativado. (LI et al. 2010).

2.3. Ativadores

A ativação alcalina ou geopolimerização é um processo definido por Davidovits (2009) que ocorre entre aluminossilicatos e um ativador químico em meio aquoso, em condições altamente alcalinas. Conforme Wallah (2006), os geopolímeros são formados por materiais cimentícios suplementares e os líquidos alcalinos, sendo que estes líquidos podem ser à base de sódio ou potássio. Entre os principais exemplos estão o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH).

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

Conforme Fernadéz (2009), o tipo de material utilizado como ativador químico e a quantidade de íons hidroxila disponíveis na solução após o contato com a água

influenciam o desenvolvimento da resistência do geopolímero produzido, concluindo-se que um aumento da concentração molar resulta em uma maior resistência.

A ativação independe dos cátions alcalinos e alcalinos terrosos (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Ba^{++} , NH_4^+ , H_3O^+); podendo ser utilizado qualquer cátion, provindo de fonte alcalina. No entanto, o Na^+ e K^+ representam a grande maioria dos estudos. Para favorecer a escolha é importante conhecer o material de origem e o tipo de geopolímero que se pretende produzir (BOCA SANTA, 2012).

A concentração do ativador a ser usada na composição do geopolímero é um dos principais fatores em estudo. Para Konmitsas et al. (2007) o excesso de ativador pode formar carbonato de sódio em contato com o ar. Entretanto, após diversos estudos ainda não está definida a quantidade ideal desse ativador. Conforme Olivia et al. (2008), a concentração de NaOH encontra-se na faixa de 5 a 16 mols.

Na composição de uma solução de geopolimerização, existem algumas relações na literatura que servem como parâmetros a serem seguidos (Tabela 2). O estudo realizado por Duxson (2007) apresentou estas relações:

Tabela 2 - Razões ideais para formulações de Geopolímeros.

| Relações indicadas | | |
|---------------------------|---|--------|
| 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, p. 9).

Diferentemente da hidratação do cimento Portland que resulta em C-S-H- gel ($\text{CaO SiO nH}_2\text{O}$), 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 $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{SiO}_2 - n\text{H}_2\text{O}$ tipo gel [N–A–S–H gel].

2.4. Lâmpadas Fluorescentes

“O vidro começou a ser fabricado de forma rudimentar pelos egípcios, desde a mais remota antiguidade, (século 27 a.C.) e acompanha a história do homem, estando cada vez mais presente na vida moderna” (CRISIGIOVANNI, 2010, p. 15).

Para Alves et al. (2001), o vidro é um sólido não cristalino (ausência de simetria e periodicidade translacional) que exhibe o fenômeno de transição vítrea, podendo ser obtido a partir de qualquer material orgânico, inorgânico ou metálico. Em sua forma pura, é um óxido metálico, transparente, de elevada dureza, essencialmente inerte e biologicamente inativo (CRISIGIOVANNI, 2010).

Segundo Bardini *et al.* (2007, p.19), o vidro é composto por areia, calcário, barrilha, alumina, corantes ou descorantes. Conforme Pinto (2004), o vidro pode ser um ótimo recurso para a correção do teor de sílica dos materiais precursores geopoliméricos, uma vez que quando a razão molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ é menor que a prevista, o teor de sílica terá então de fazer-se, ou por adição direta de sílica amorfa, ou à custa da adição de um material com uma razão superior à que existe nos metacaulins. A Tabela 3 mostra a comparação das composições químicas do metacaulim e do vidro.

Tabela 3 - Composição química dos vidros e do metacaulim.

| Óxidos (%) | MK | PLF |
|--|-------|-------|
| SiO ₂ | 54,40 | 70,57 |
| TiO ₂ | 1,55 | 0,05 |
| Al ₂ O ₃ | 39,40 | 2,48 |
| FeO ₃ | 1,75 | 0,28 |
| MgO | 0,14 | 3,05 |
| CaO | 0,10 | 5,59 |
| MnO | 0,01 | 0,01 |
| Na ₂ O | - | 14,49 |
| K ₂ O | 1,03 | 1,35 |
| SO ₃ | - | 0,19 |
| P ₂ O ₅ | 0,06 | 0,06 |
| LOI | 2,66 | 0,95 |
| Razão SiO ₂ /Al ₂ O ₃ | 1,38 | 28,46 |

Fonte: Novais (2016, p. 246).

A utilização do vidro para a produção dos geopolímeros visa o aumento das propriedades físicas e mecânicas da composição, bem como a preocupação com o desenvolvimento da construção civil sustentável. O Brasil produz em média 800 mil toneladas de vidro por ano, sendo que desse total 220.000 t/ano são recicladas, o que corresponde a 27,6 % do total gerado (LOPES et al., 2005). Segundo Crisigiovanni (2010), essa reciclagem é vista como uma atividade marginal, de subsistência e como tal, necessita de maior conscientização de todos os segmentos da sociedade.

No Brasil, são consumidas, por ano, aproximadamente, 100 milhões de lâmpadas fluorescentes. Porém, a grande maioria, 94 %, não passa por um processo de reciclagem (POLANCO, 2007).

Os pesquisadores ZANICHELII (2004) e MOMBACH (2008), classificam as alternativas existentes para a destinação final e/ou tratamento das lâmpadas da seguinte forma:

- Disposição em aterros (com ou sem pré-tratamento);
- Moagem simples (com ou sem separação dos componentes);
- Moagem com tratamento térmico;
- Moagem com tratamento químico;
- Tratamento por sopro;

- Solidificação/Encapsulamento (cimento e ligantes orgânicos).

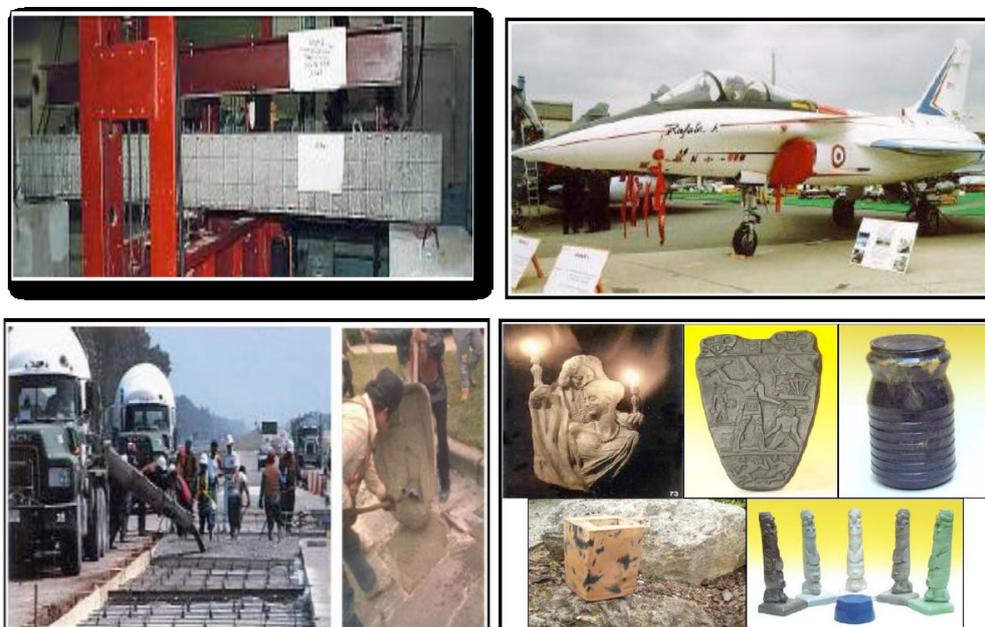
Portanto, feito o processo correto de reciclagem das lâmpadas fluorescentes, as mesmas poderão ser utilizadas na fabricação dos geopolímeros em sua aplicação na engenharia civil.

2.5. Aplicações na construção civil

Embora a utilização dos concretos e cimentos geopoliméricos ainda restrinja-se aos países desenvolvidos, têm-se grandes pesquisas dirigidas para o seu desenvolvimento, devido à ampla gama de aplicações para estes materiais (Vassalo, 2013). Na Austrália, Canadá e Europa, o concreto geopolimérico é utilizado como dormentes de ferrovias, painéis pré-fabricados de edificações, blocos, refratários, reparações de rodovias, obras de infraestrutura e outros (SONAFRANK, 2010).

Diversas outras aplicações dos geopolímeros na construção civil foram citadas por Davidovits (2002), entre elas estão os geopolímeros resistentes ao fogo aplicados desde o Egito antigo; reparação de rodovias e demais obras de infraestrutura; aplicação no setor aeroviário e vigas de concreto geopolimérico para reforço de pontes danificadas e edifícios em terremotos ou áreas propensas a furações. A Figura 4 mostra algumas dessas aplicações apresentadas por Davidovits.

Figura 4 - Aplicação dos geopolímeros na construção civil.



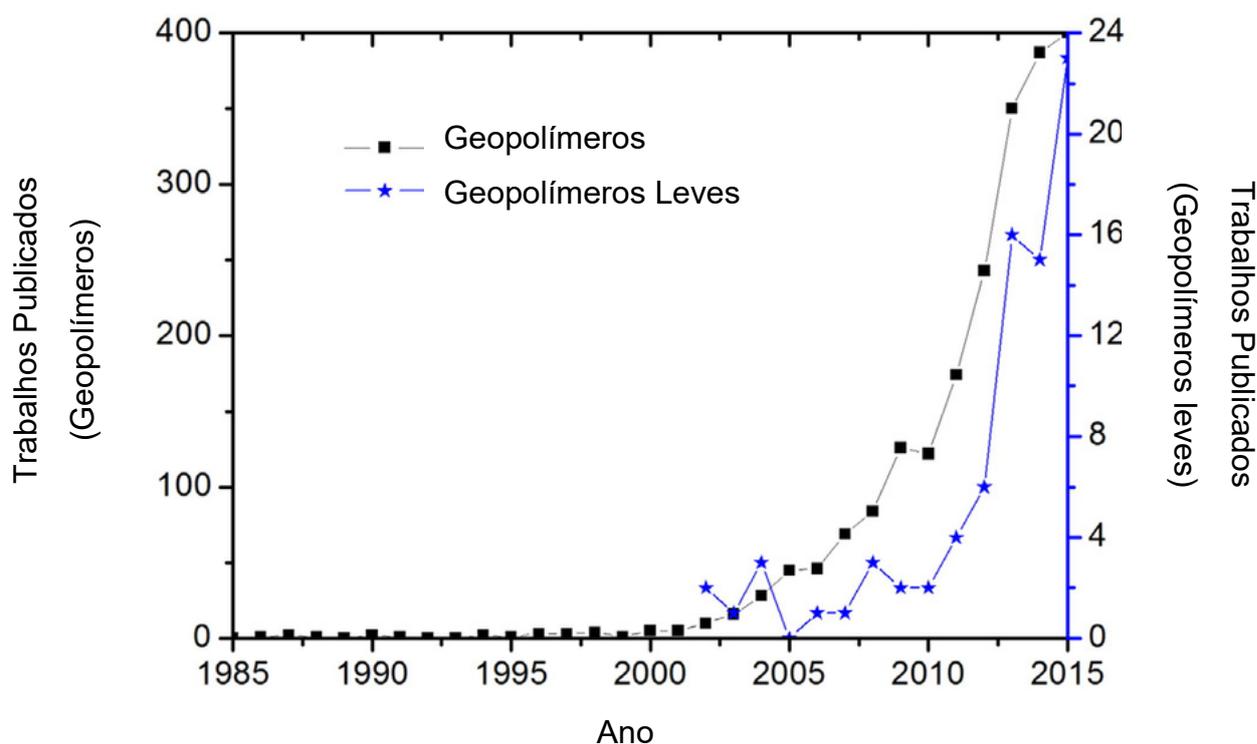
Fonte: Davidovits (2002, p. 16).

Atualmente os geopolímeros estão recebendo maior espaço no mundo da construção, contudo, ainda é necessário aumentar o conhecimento destes materiais para torná-los economicamente viáveis em utilizações generalizadas (SIMÕES, 2012).

2.6. Geopolímeros Leves

Tendo em vista a enorme utilização do cimento Portland nas indústrias da construção civil e a falta de normatizações para argamassas e concretos geopoliméricos, uma alternativa para a implementação dos geopolímeros de forma efetiva seria o estudo de novas aplicações baseados em geopolímeros leves. Nos últimos anos, diversos estudos vêm ganhando espaço em atmosfera global no mundo geopolimérico. A Figura 5 apresenta os diversos trabalhos a respeito de geopolímeros leves.

Figura 5 - Trabalhos publicados sobre geopolímeros e geopolímeros leves.



Fonte: Novais (2016, p. 552).

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 filtros 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).

Tais fatores devem ser levados em consideração para a produção de geopolímeros leves. Com isso, algumas características peculiares deste material podem ser percebidas, tais como: diminuição da resistência mecânica, homogeneidade dos poros, aumento da condutividade térmico-acústica e boa trabalhabilidade.

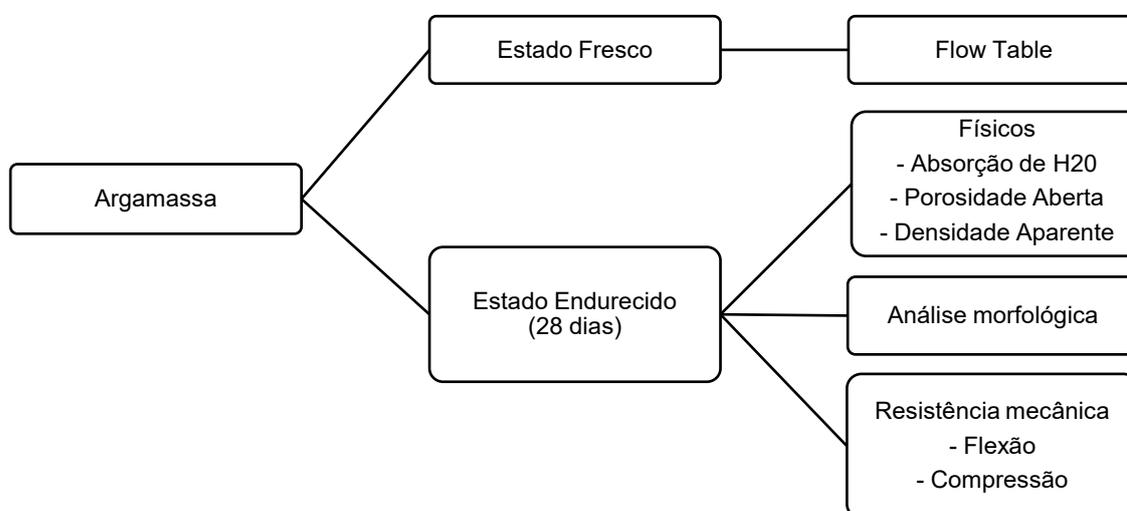
3. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo serão apontados os materiais, métodos e equipamentos utilizados para a produção de argamassas geopoliméricas. A fim de analisar a influência da adição do pó de vidro de lâmpada fluorescente e do pó de alumínio nas amostras, um plano experimental foi realizado de forma que ambos fossem aplicados, primeiramente, em formulações distintas e logo após, em efeito combinado, objetivando caracterizar as propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.

Desta forma, para a obtenção das amostras citadas, a molaridade da solução, a relação silicato/solução, o traço cimento/areia e a relação sólido/líquido foram mantidos constantes enquanto que, as quantidades da fonte de aluminossilicato (metacaulim e pó de vidro de lâmpada fluorescente) e pó de alumínio, variaram.

Após a definição das formulações, uma série de ensaios foram realizados para a caracterização das amostras no estado fresco e endurecido das argamassas geopoliméricas. A Figura 6 esquematiza todos os ensaios definidos para análise.

Figura 6 - Ensaio para caracterização de argamassas.



Fonte: Autor, 2017.

Todos os ensaios laboratoriais necessários para a produção dos corpos de prova foram realizados nos Laboratórios de Materiais de Construção e Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável (LablConS), ambos localizados na UFSC Joinville. Para a caracterização das argamassas, alguns ensaios foram conduzidos com o 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.

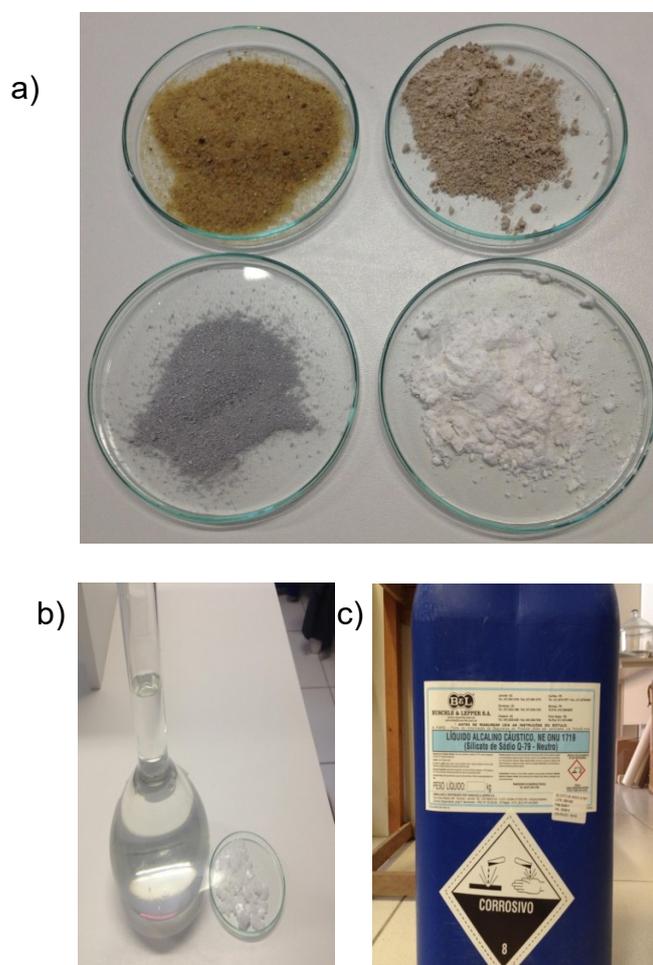
3.1. Materiais

Em sua concepção geral, a argamassa baseia-se em um material cimentício gerado pela mistura entre água, cimento e areia. Para o presente estudo, buscaram-se novas alternativas para a substituição da argamassa de cimento Portland tradicional por um aglomerante com características semelhantes no aspecto estrutural, porém, obtido de forma mais sustentável, os geopolímeros. Devido a esta substituição, a argamassa proposta para o estudo, conteve as seguintes matérias primas:

- Metacaulim e pó de vidro de lâmpada fluorescente (PLF) como aglomerantes, desempenhando as características do cimento Portland;
- Solução de $H_2O + NaOH$ (10 molar) + Silicato de sódio, como agente ativador alcalino;
- Areia como agregado miúdo;
- Pó de alumínio como agente formador de poros.

A Figura 7 apresenta todos os materiais usados para a produção dos corpos de provas das argamassas.

Figura 7 - Matérias primas utilizadas na produção de argamassas geopoliméricas: a) Areia média, Metacaulim, PA, PLF; b) Solução NaOH (10 M); c) Silicato de sódio.



Fonte: Autor, 2017.

Para a produção dos corpos de prova, empregaram-se quantidades variáveis de metacaulim e pó de vidro de lâmpada fluorescente, conforme diferentes formulações. O metacaulim foi cedido pela empresa Metacaulim Brasil contendo o nome Metacaulim HP Ultra. Esta matéria prima segue as especificações da norma NBR 15894/10. Enquanto que, o PLF foi cedido pela empresa Apliquim Brasil Recicle - Indaial, SC, totalmente isento de mercúrio.

A composição química do metacaulim foi determinada por meio do ensaio de fluorescência de raios-X e o resultado encontra-se na Tabela 4. Com isso, pode-se perceber que a matéria prima contém percentuais consideráveis de Alumina (Al_2O_3) e Sílica (SiO_2).

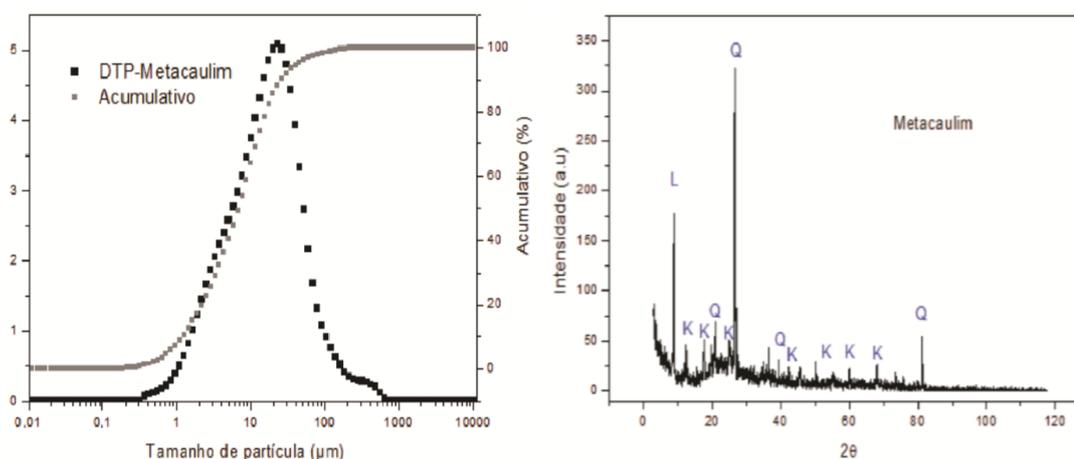
Tabela 4 - Composição química do metacaulim.

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

Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT, 2015.

O grau de cristalinidade dos componentes do metacaulim foi determinado pela difração de raios-X e as fases cristalinas caulinita (K), quartzo (Q) e mica (L) foram identificadas. A Figura 8 apresenta os resultados do ensaio.

Figura 8 – a) Distribuição do tamanho de partículas do metacaulim; b) Difração de raios-X do metacaulim.



Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT, 2015.

No PLF, a presença de sílica (SiO₂) representa mais de 70% de sua composição química (Tabela 5), portanto, trata-se de um material com ótimas características que pode contribuir para o equilíbrio da razão Al₂O₃/SiO₂, discutida na seção anterior (página 13).

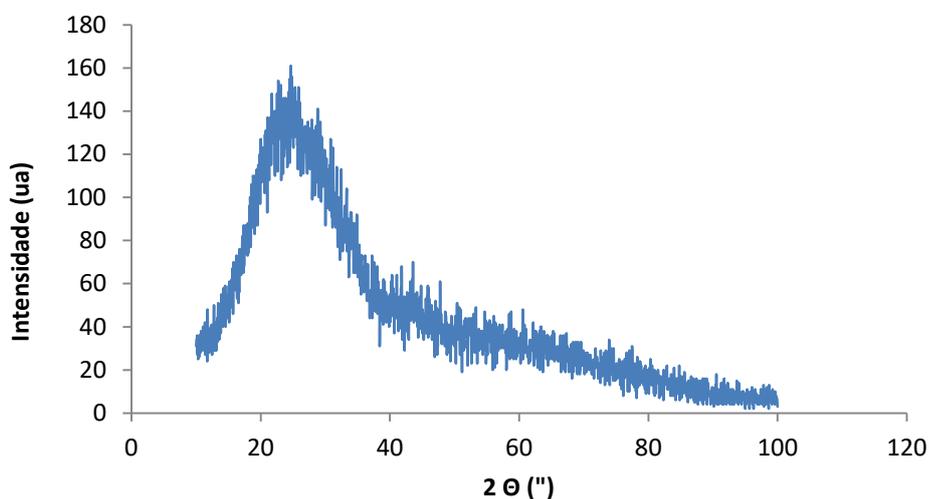
Tabela 5 - Composição química do PLF determinada por FRX.

| Elementos | Teor (%) | Elementos | Teor (%) |
|--------------------------------|----------|-------------------------------------|----------|
| Al ₂ O ₃ | 2,48 | B ₂ O ₃ | - |
| CaO | 5,02 | Li ₂ O | - |
| Fe ₂ O ₃ | 0,07 | BaO | 0,18 |
| K ₂ O | 1,15 | Co ₂ O ₃ | < 0,1 |
| MgO | 2,21 | Cr ₂ O ₃ | < 0,1 |
| MnO | < 0,05 | PbO | 0,1 |
| Na ₂ O | 14,9 | SrO | 0,09 |
| P ₂ O ₅ | < 0,05 | ZnO | < 0,1 |
| SiO ₂ | 72,6 | ZrO ₂ + HfO ₂ | < 0,1 |
| TiO ₂ | < 0,05 | Perda fogo | 0,52 |

Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT, 2017.

Ensaio de difração de raio-X também foram realizados para a obtenção do grau de cristalinidade do pó. A Figura 9 mostra os resultados do ensaio para partículas de 45 µm.

Figura 9 - Difração de raios-X PLF.



Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT, 2017.

Após a realização do ensaio, concluiu-se que o PLF contém uma estrutura consideravelmente amorfa por não possuir picos de cristalinidade, portanto, melhora a interação com os demais óxidos presentes nos geopolímeros.

Os ativadores alcalinos (hidróxido de sódio e silicato de sódio), utilizados nas argamassas para que a polimerização ocorra, são fabricados e fornecidos pela empresa Buschle & Lepper S/A e suas especificações técnicas encontram-se nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Características do hidróxido de sódio.

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

Fonte: Departamento técnico – Buschle & Lepper S/A, 2016.

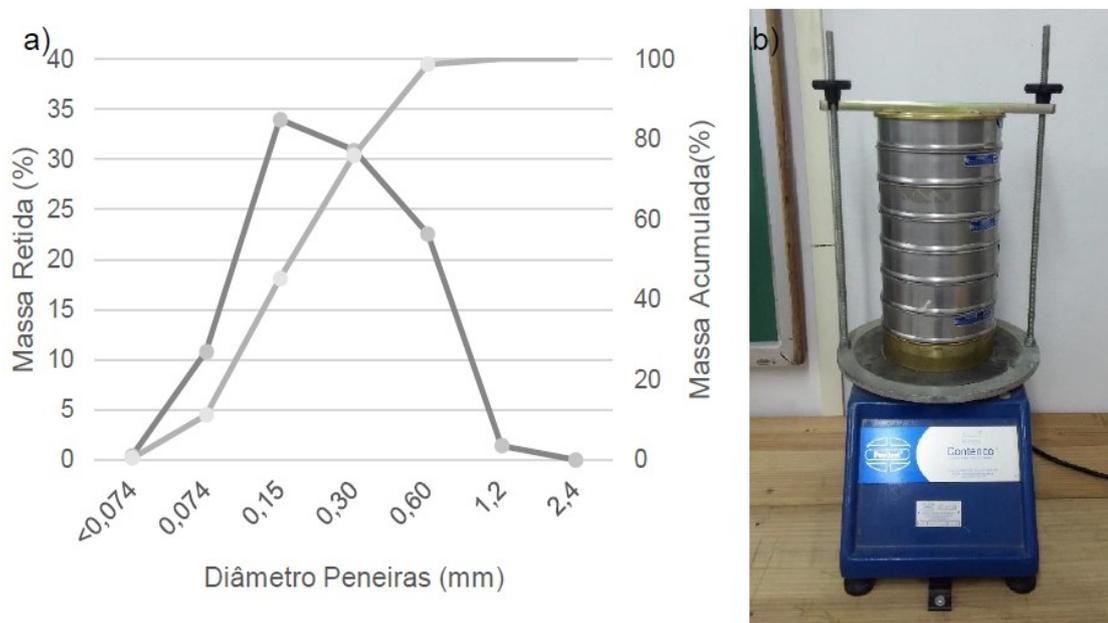
Tabela 7 - Composição química do silicato de sódio

| Composição química | | | |
|---------------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Óxidos | Na ₂ O | SiO ₂ | H ₂ O |
| Silicato | 9,11% | 28,50% | 61,18% |

Fonte: Buschle & Lepper S/A, 2016.

O agregado utilizado na composição dos traços foi uma areia de origem silícea, fornecida pela empresa Supremo Concreto. 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 10.

Figura 10 - a) Composição granulométrica da areia; b) Peneirador vibratório.

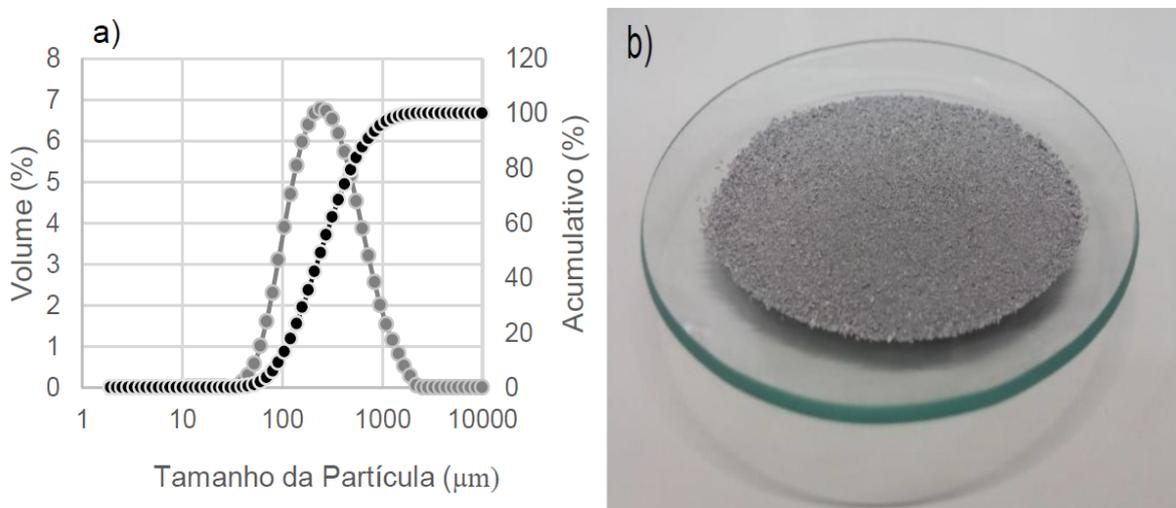


Fonte: Hartmann (2016, p. 30).

Conforme a NBR7214, a areia utilizada contém 1,4% de fração grossa, 23% de fração média-grossa, 31% da fração média-fina e 34% de fração fina e 11,2% de material passante na peneira 1,2 mm. Portanto, o agregado miúdo utilizado para a produção dos corpos de prova é considerado como areia média.

Com o intuito de produzir a formação de poros nas argamassas geopoliméricas, o pó de alumínio foi adicionado nas formulações, juntamente com as demais matérias primas. O material foi cedido pela empresa Alcoa e um estudo feito no Núcleo de pesquisas – CERMAT avaliou a variação granulométrica das partículas de alumínio. Os resultados estão expostos na Figura 11.

Figura 11 - a) Distribuição granulométrica do pó de alumínio; b) Amostra de pó de alumínio.



Fonte: Núcleo de pesquisas CERMAT, 2016.

Testes laboratoriais preliminares mostraram que granulometrias menores tendem a gerar bolhas menores e com rápida velocidade de reação, enquanto que, partículas maiores proporcionam poros maiores e com menor velocidade de reação.

3.2. Metodologia Experimental

O presente trabalho contém duas etapas principais a serem seguidas para que os objetivos do mesmo sejam alcançados. Primeiramente, foram definidas as formulações, produzidos os corpos de prova e colocados em processo de cura. A segunda etapa baseia-se nos ensaios de caracterização das argamassas para a obtenção de um maior entendimento das adições do PLF e do pó de alumínio de forma individual e conjunta.

3.2.1. Definição e produção das amostras

Por meio de um planejamento experimental, previamente definido, foram desenvolvidas nove formulações para avaliar os efeitos da adição do PLF, como

fonte de sílica e do pó de alumínio, como agente formador de poros, bem como, seu efeito combinado.

Utilizando os dados de composição química e cristalinidade das matérias primas, uma formulação de referência foi proposta (Tabela 8), obedecendo às relações das propriedades físicas e químicas citadas por Davidovits (pg 19). Partindo deste ponto, as demais formulações foram realizadas, primeiramente adicionando apenas o pó de alumínio em 0,15 % e 0,30%, seguido pela aplicação somente do pó de vidro 10% e 20% e finalmente com sua adição composta. A Tabela 9 apresenta todas as formulações propostas para estudo.

Tabela 8 - Relações argamassa de referência.

| Formulação argamassa de referência | | | | |
|---|------|-------------|----------|-----------|
| Traço | MK | NaOH (10 M) | Silicato | Razão S/L |
| 1:2 | 100% | 55% | 45% | 1,55 |

Fonte: Autor, 2017.

Tabela 9 - Formulações propostas.

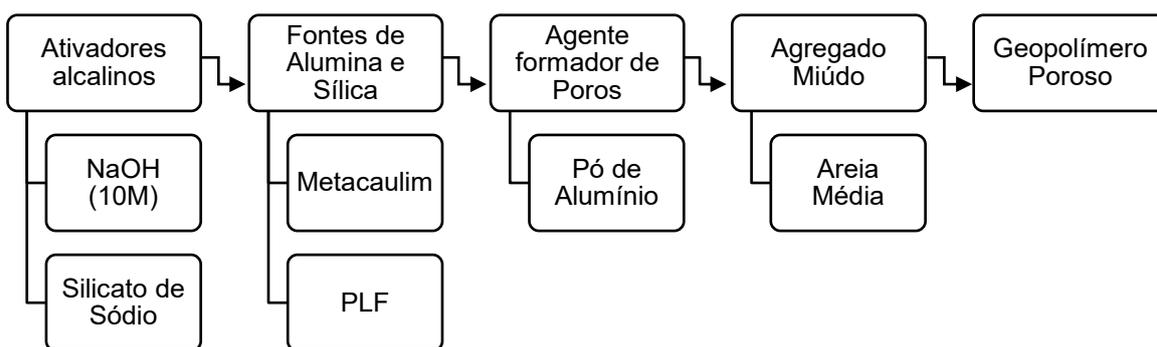
| Formulação | S/L | MK (%) | PVLF (%) | PA (%) | NaOH 10M (%) | Silicato (%) | Traço |
|------------|------|--------|----------|--------|--------------|--------------|-------|
| F1 | 1,55 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 55,00 | 45,00 | 1:2 |
| F2 | 1,55 | 100,00 | 0,00 | 0,15 | 55,00 | 45,00 | 1:2 |
| F3 | 1,55 | 100,00 | 0,00 | 0,30 | 55,00 | 45,00 | 1:2 |
| F4 | 1,55 | 90,00 | 10,00 | 0,00 | 55,00 | 45,00 | 1:2 |
| F5 | 1,55 | 90,00 | 10,00 | 0,15 | 55,00 | 45,00 | 1:2 |
| F6 | 1,55 | 90,00 | 10,00 | 0,30 | 55,00 | 45,00 | 1:2 |
| F7 | 1,55 | 80,00 | 20,00 | 0,00 | 55,00 | 45,00 | 1:2 |
| F8 | 1,55 | 80,00 | 20,00 | 0,15 | 55,00 | 45,00 | 1:2 |
| F9 | 1,55 | 80,00 | 20,00 | 0,30 | 55,00 | 45,00 | 1:2 |

Fonte: Autor, 2017.

O procedimento realizado para a produção dos corpos de provas prismáticas segue a sequência apresentada na Figura 12. A solução ativadora NaOH (10 M) + silicato de sódio foi colocada em um recipiente e misturada em um misturador magnético durante 5 minutos. Logo após a solução foi colocada sobre as fontes de alumina e sílica e foram misturadas em um agitador mecânico durante 5 minutos em velocidade 3. Durante 1 minuto a mistura foi feita manualmente para a retirada de material nas laterais da cuba que não se misturaram na máquina e então, foi levado novamente para o misturador mecânico para mais 5 minutos. Finalizados os 10

minutos de mistura, o agregado miúdo (areia) foi adicionado por mais dois minutos no misturador. Por fim, a adição do pó de alumínio foi feita somente nos 30 segundos finais da mistura e com velocidade reduzida de 3 para 1 com o intuito de que o processo de formação de bolhas não seja quebrado. Os equipamentos utilizados para a produção das argamassas estão expostos na figura 13.

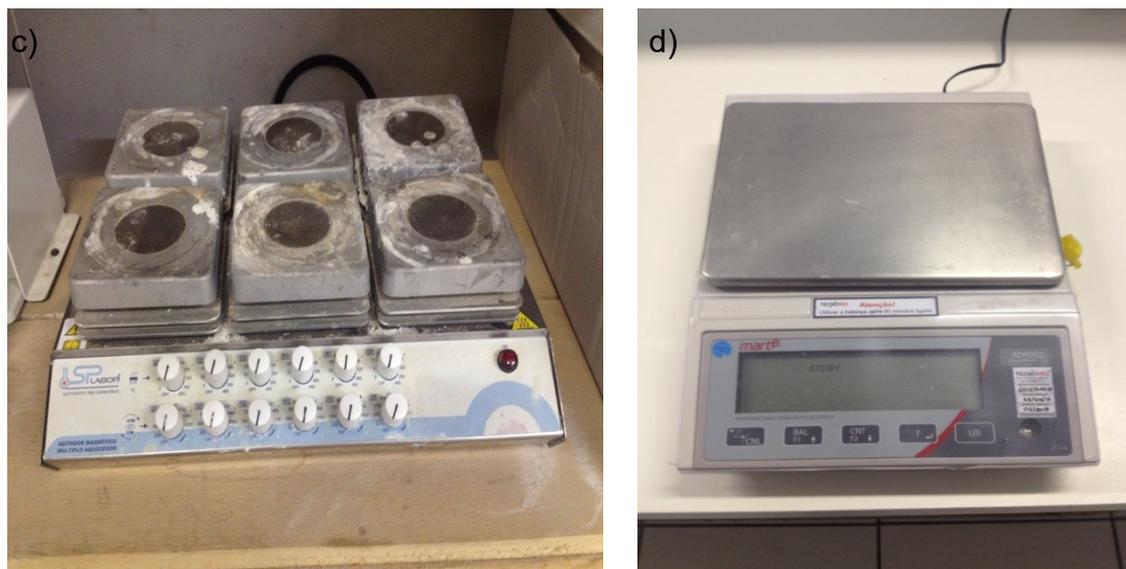
Figura 12- Fluxograma produção das argamassas geopoliméricas.



Fonte: Autor, 2017.

Figura 13 - Equipamentos utilizados para a produção de argamassa: a) misturador mecânico, b) espátulas e moldes, c) agitador magnético, d) balança de precisão.





Fonte: Autor, 2017.

Como um dos principais objetivos do trabalho foi a formação de poros, é de grande importância ressaltar que logo após a realização das misturas, a argamassa não foi adensada conforme a norma NBR13279. Para a confecção dos corpos de prova a abordagem foi dada de forma diferenciada. A mistura final foi colocada nos moldes de maneira uniforme para que a formação de bolhas ocorresse livremente durante 30 minutos. Após este processo os corpos de prova foram nivelados com uma espátula para que obtivessem o tamanho ideal definido por norma. Então foram levados a estufa durante 24 horas a temperatura de 40° C e depois retirados, desenformados e posicionados em uma sala a temperatura ambiente durante 27 dias (Figura 14).

Figura 14 – Corpos de prova em processo de cura.



Fonte: Autor, 2017.

Corpos de prova sem a adição de pó de alumínio também não receberam nenhum processo de adensamento para que toda a realização fosse feita de forma padrão e este fator permanecesse constante.

3.2.2. Ensaio no estado fresco

O ensaio de mesa (*flow table*), especificado pelas normas NBR7215 e NBR13276, tem por objetivo analisar e avaliar as argamassas quanto a sua consistência e plasticidade. No presente trabalho, este ensaio foi utilizado para a determinação da relação sólido/líquido ideal para um intervalo ideal de aberturas.

Segundo a norma, o ensaio deve ser realizado imediatamente após a preparação da mistura. O preenchimento dos moldes seguiu uma indicação e foi dividido em três etapas aonde utilizou-se um soque para adensar a mistura em iguais quantidades de massa, após a colocação de cada terço de massa foram proferidos 15, 10 e 5 golpes, respectivamente. Após a preparação do molde, foram deferidas 30 batidas no intervalo de 1 segundo para cada golpe proferido. A Figura 15 apresenta os equipamentos do ensaio.

Figura 15 - Ensaio de mesa (Flow Table).



Fonte: Autor, 2017.

3.2.3. Ensaio no estado endurecido

Armazenados em estufa a temperatura de 40° C, durante as 24 horas iniciais, os corpos de prova são desmoldados e posicionados em sala a temperatura ambiente até que atinjam 28 dias de cura para os ensaios de rompimento a flexão e compressão.

O experimento foi realizado em uma máquina universal para ensaios mecânicos de tração, compressão e flexão, de modelo EMIC 23-100, eletromecânica, microprocessada de marca INSTRON/EMIC. Contendo as principais características de: Capacidade: 100KN (10000kgf); Tipo: Dupla coluna autoportante e acionamento por meio de fusos de esferas recirculares pré-carregadas com sistema de colunas guias cilíndricas (EMIC, 2016). A Figura 16 apresenta os equipamentos utilizados para a realização do ensaio.

Figura 16 - Equipamentos para ensaio em estado endurecido – a) Estufa, b) Máquina universal para ensaios mecânicos, c) Ensaio de flexão, d) Ensaio de compressão.



Fonte: Autor, 2017.

Todos os ensaios de rompimento dos 27 corpos de prova foram realizados no mesmo dia, obedecendo assim, a indicação dos 28 dias de cura. Após a realização destes ensaios, as propriedades físicas das amostras também foram estudadas.

3.2.4. Propriedades físicas: absorção, densidade aparente e porosidade aberta

Os ensaios de caracterização física (absorção, densidade aparente e porosidade aberta) foram realizados com 28 dias de cura a fim de, correlacionar os tais resultados com os obtidos nos testes de 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 em:

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

Onde:

ms = massa seca

mi = massa imersa

mss = massa saturada com superfície seca

Figura 17 - Ensaio de Arquimedes.



Fonte: Autor, 2017.

Após a obtenção de todos os pesos, as equações abaixo possibilitam a determinação da absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta das amostras.

$$\text{Absorção de água} = \frac{m_{SS} - m_S}{m_S} \times 100 ; \quad \text{Eq. 2}$$

$$\text{Densidade aparente} = \frac{m_S}{m_{SS} - m_i} ; \quad \text{Eq. 3}$$

$$\text{Porosidade aberta} = \frac{m_{SS} - m_S}{m_{SS} - m_i} \times 100 . \quad \text{Eq. 4}$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo serão apresentados os resultados obtidos da caracterização das matérias primas utilizadas, bem como dos ensaios realizados para as argamassas geopoliméricas e suas respectivas discussões.

4.1. Caracterização das matérias primas

A caracterização física do metacaulim apresentou um tamanho médio de partícula na ordem de 20 μm , sendo SiO_2 e Al_2O_3 os óxidos mais representativos da amostra (Tabela 4). Como esperado, o metacaulim é uma fonte representativa de aluminossilicatos. Sua razão molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2,9$ indica um teor de alumina em excesso, portanto, para que esta relação atinja o valor ideal proposto por Davidovits, adiciona-se uma fonte extra de sílica em sua composição.

Usando os ensaios de difração de raios-X foram identificadas fases cristalinas no material, tais como: caulinita (K), quartzo (Q) e mica (L). A existência desses picos indica que o metacaulim usado contém uma estrutura (matriz) que, apesar de grandes proporções de sílica e alumina, não encontra-se totalmente amorfa, implicando em um menor grau de reatividade. Esse comportamento influencia diretamente no comportamento no estado fresco (trabalhabilidade) e desempenho do material endurecido (resistência mecânica e propriedades físicas).

Outra característica importante trata-se da área superficial, pois, uma grande área superficial indica acréscimo de reatividade. De acordo com o estudo, o metacaulim possui área superficial de 32700 m^2/kg . Se comparado à área superficial do cimento Portland (CP II Z), o metacaulim contém uma área superficial aproximadamente 90 vezes maior (COIMBRA, M.A, 2006).

Diferentemente do metacaulim, o PLF não contém Al_2O_3 em grande quantidade, porém, nota-se que a porcentagem de SiO_2 ultrapassa 70% de sua composição química (Tabela 5), portanto, o PLF não é indicado para a geração de aluminossilicatos de forma isolada, mas em conjunto com o metacaulim, torna-se uma interessante alternativa para o aumento da relação entre alumina e sílica.

O ensaio de difração de raios-X (Figura 9) apresentou resultados que comprovam que o PLF trata-se de um material altamente amorfo, pois, não contém picos de cristalinidade em seu meio, indicando, portanto, alta reatividade com as demais matérias primas. A Tabela 10 enumera as diferentes composições das argamassas geopoliméricas desenvolvidas no trabalho com a adição de PLF e suas respectivas relações $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Tabela 10 - Formulações com diferentes quantidades de PLF.

| | | | |
|--|------|------|------|
| MK (%) | 100 | 90 | 80 |
| PLF (%) | 0 | 10 | 20 |
| SiO₂/Al₂O₃ | 3,68 | 4,14 | 4,71 |

Fonte: Autor, 2017.

Com isso, pode-se afirmar que o pó de lâmpada fluorescente é um resíduo residencial e industrial com grande potencial para ser aplicado na composição dos geopolímeros, pois, a substituição parcial do metacaulim por este material faz com que a relação SiO₂/Al₂O₃ aumente e o custo para a produção das argamassas diminua.

4.2. Caracterização do agente formador de poros

O pó de alumínio empregado para o desenvolvimento de argamassas porosas teve sua granulometria analisada e os resultados mostram que o tamanho médio das partículas é de 257 µm. Como o alumínio possui a densidade de 2600 kg/m³ levando em consideração o volume médio das partículas, em uma amostra de 0,1 gramas de material, existem aproximadamente 2,92 bilhões de partículas. Considerando que cada partícula pode ser responsável pela geração de 1 poro, estes valores levam a um resultado substancial de poros.

A relação entre o tempo e a reação responsável pela formação de poros é interferida pelo tamanho da partícula do seu agente formador. No presente estudo, a atuação do pó de alumínio era notada em até 30 minutos após sua adição. Tal informação foi coletada através da percepção auditiva, proveniente da formação dos poros no interior da matriz geopolimérica.

A quantidade e tamanho dos poros também estão relacionados com o tamanho da partícula do pó de alumínio. A Figura 18 apresenta uma das formulações de argamassas geopoliméricas porosas desenvolvidas no trabalho.

Figura 18 - Argamassas geopoliméricas porosas com 0,3% de PA.



Fonte: Autor, 2017.

Além da quantidade de poros, outros fatores são perceptíveis e importantes nessa relação, tais como: trabalhabilidade da argamassa, relação aglomerante/agregado e resistência mecânica.

4.3. Ensaio no estado fresco

Com o intuito inicial de determinar o teor de água a ser aplicado na argamassa de referência, o ensaio de consistência foi realizado. Argamassas contendo apenas metacaulim como aglomerante foram desenvolvidas com diversos teores de solução alcalina (Silicato de Sódio + NaOH 10M) e o valor ideal para o espalhamento inicial da amostra foi fixado em 225 milímetros.

Das análises previamente realizadas, notou-se que um aumento na quantidade de silicato de sódio (Na_2SiO_3) mesmo mantida constante a relação sólido/líquido, influenciava diretamente na abertura da argamassa na mesa. Isso se explica pelo fato do silicato ser mais viscoso em comparação a solução de hidróxido de sódio 10 molar. A Figura 19 apresenta o espalhamento da amostra de referência.

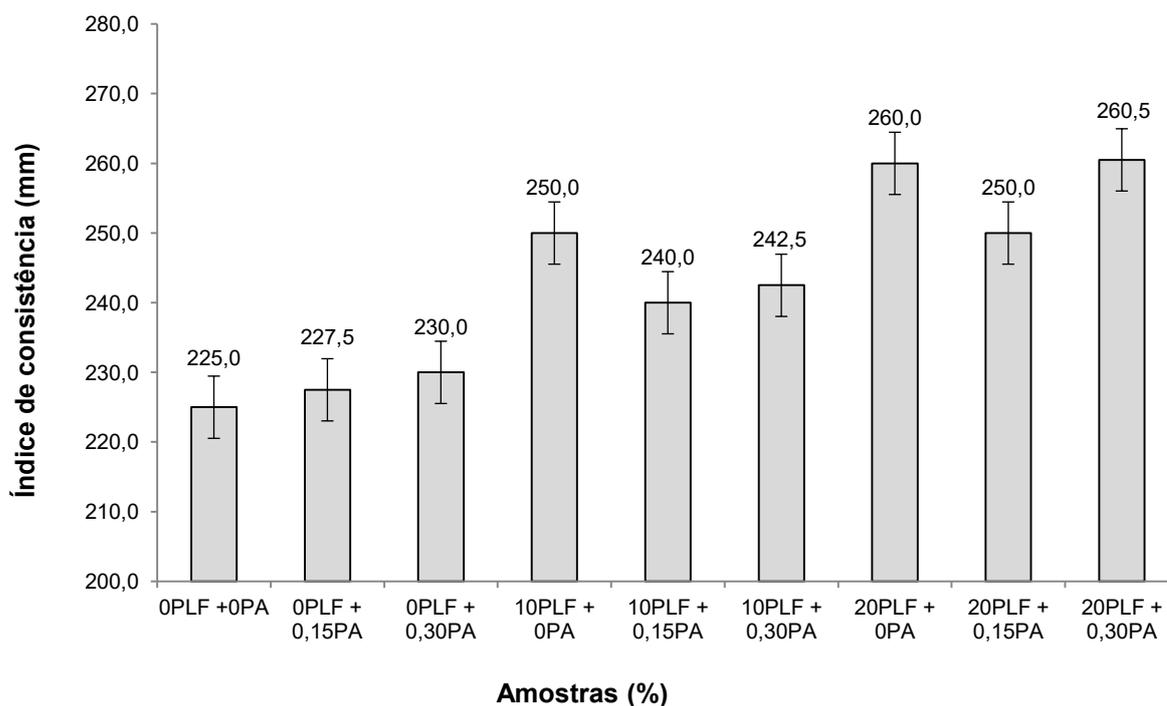
Figura 19 - Espalhamento inicial da argamassa de referência.



Fonte: Autor, 2017.

Os valores do índice de consistência foram obtidos logo após a produção das amostras. Com a adição do agente formador de poros (pó de alumínio), notou-se que o espalhamento de todas as amostras foram alterados e acrescidos. Tais resultados são esperados, pois, o pó de alumínio provoca a 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). Todos os resultados obtidos para as 9 formulações encontram-se na Figura 20.

Figura 20 – Valores do espalhamento de todas as argamassas geopoliméricas.



Fonte: Autor, 2017.

Os resultados também apresentaram uma grande influência sobre o espalhamento após a substituição parcial do metacaulim pelo PLF. Notou-se que após esta adição as amostras tiveram um aumento em seu espalhamento e o efeito combinado do PLF com o pó de alumínio proporcionou aberturas de mesa ainda maiores. Das análises efetuadas para a caracterização das matérias primas, tem-se que o PLF possui maior diâmetro médio de partícula que o metacaulim e, este valor, implica em uma menor absorção de água pela mistura.

4.4. Análise morfológica

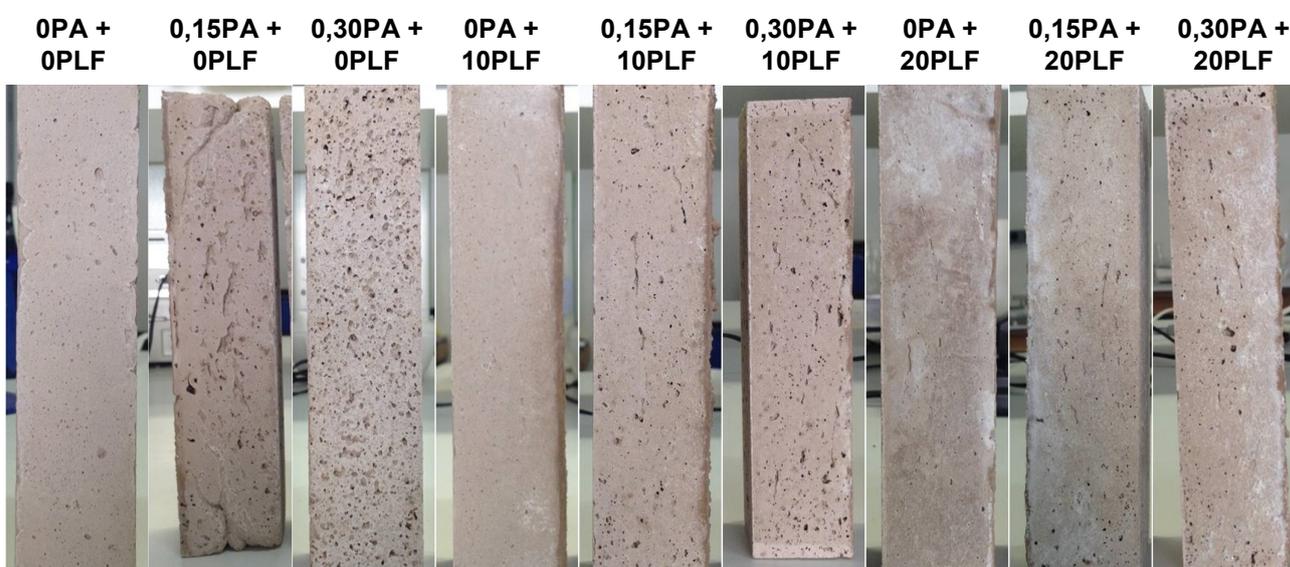
Devido à escala dos poros formados ser milimétrica, as imagens das argamassas foram obtidas por câmera de alta resolução. Com isto pode-se realizar uma análise melhor do tamanho e disposição das bolhas. Fotos das formulações foram obtidas com as amostras de 28 dias.

Amostras com diferentes teores de pó de alumínio e PLF são ilustradas na Figura 21. Notou-se que a porosidade aparente foi alterada consideravelmente nas

amostras com a adição do agente formador de poros. A amostra de referência e as amostras contendo apenas PLF são constituídas de uma matriz sólida, enquanto as demais apresentam significativa formação de poros.

Notou-se também que a substituição de 20% do metacaulim pelo PLF proporcionou a geração do fenômeno chamado eflorescência, que dá-se pela existência em excesso do íon alcalino Na^+ utilizado na ativação alcalina. Por consequência, ocorrem eflorescências cristalinas de carbonato de sódio na superfície das argamassas como mostrado abaixo:

Figura 21 - Amostras prismáticas com diferentes teores de PLF e PA.



Fonte: Autor, 2017.

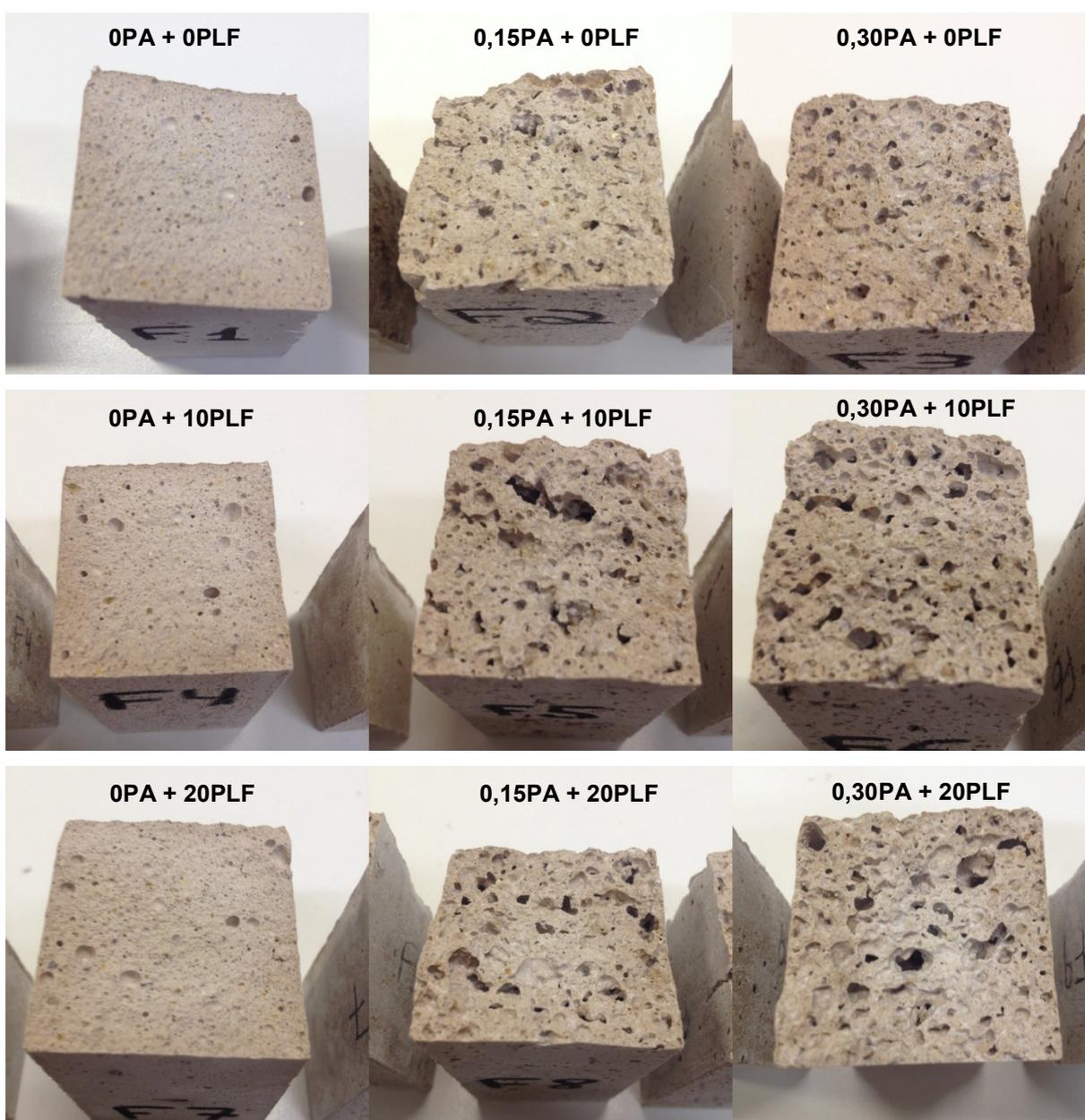
A caracterização óptica dos corpos de prova é apresentada na Figura 22. Como esperado, a quantidade do agente porogênico, bem como seu efeito combinado com a adição do PLF influenciaram no número, volume e tamanho dos poros gerados nas amostras.

À medida que as proporções de pó de alumínio e PLF são elevadas notou-se um aumento na fluidez da argamassa, que, por sua vez, está diretamente ligada com a quantidade de poros conectados e o favorecimento da formação dos mesmos. As amostras com 0,15% de pó de alumínio + 10% de PLF apresentam mais áreas sólidas com ausência de poros, enquanto que, as amostras com 0,30% de pó de alumínio + 20% de PLF apresentam maior quantidade de poros

interligados. Este fato pode influenciar diretamente na capacidade de resistência das argamassas.

As amostras contendo pó de alumínio e PLF apresentaram maior capacidade de formação de poros comparadas com as amostras apenas com o agente porogênico, entretanto, ambas continham em sua matriz uma boa distribuição dos poros, indicando que o processo de adição das partículas de alumínio na argamassa geopolimérica foi bem sucedido.

Figura 22 - Caracterização óptica das argamassas a 28 dias de cura

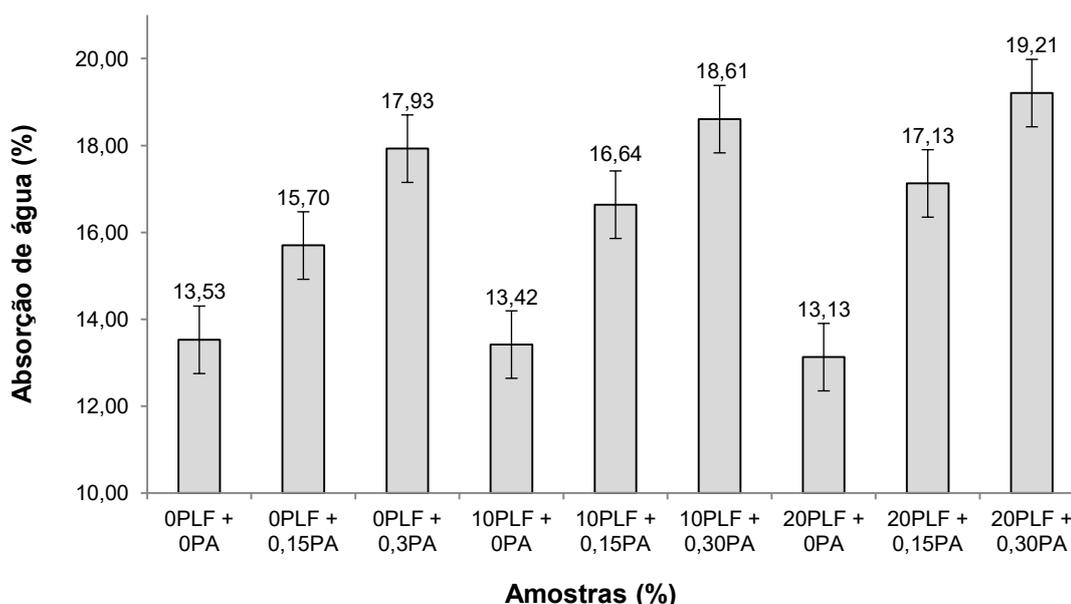


Fonte: Autor, 2017.

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

Os resultados de absorção de água nas argamassas (Figura 23) decrescem à medida que o PLF é adicionado de forma isolada na mistura (amostras 0%PLF, 10%PLF e 20%PLF), entretanto, no momento em que o pó de alumínio é adicionado, a formação de poros na estrutura faz com que a absorção de água aumente, não apenas nas amostras com pó de alumínio, mas, com o efeito combinado do PA com o PLF, de tal forma que o maior valor obtido é da amostra contendo 0,30% de PA e 20% de PLF.

Figura 23 - Absorção de água das argamassas geopoliméricas com 28 dias de cura.



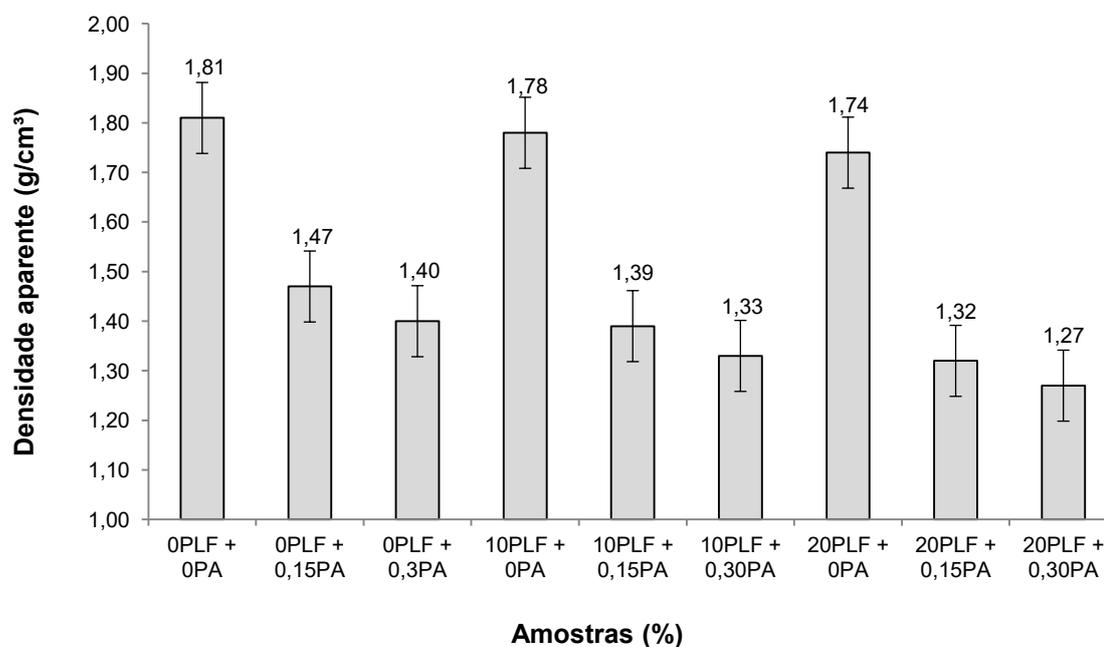
Fonte: Autor, 2017.

Por meio de ensaios previamente realizados, estes resultados foram esperados, pois, usando a análise morfológica, notou-se que a amostra com efeito combinado máximo entre PA e PLF apresentou maior geração de poros e por consequência, maior absorção de água.

Os valores de densidade aparente (Figura 24) apresentaram um comportamento inverso aos resultados referentes à absorção de água. Desse modo,

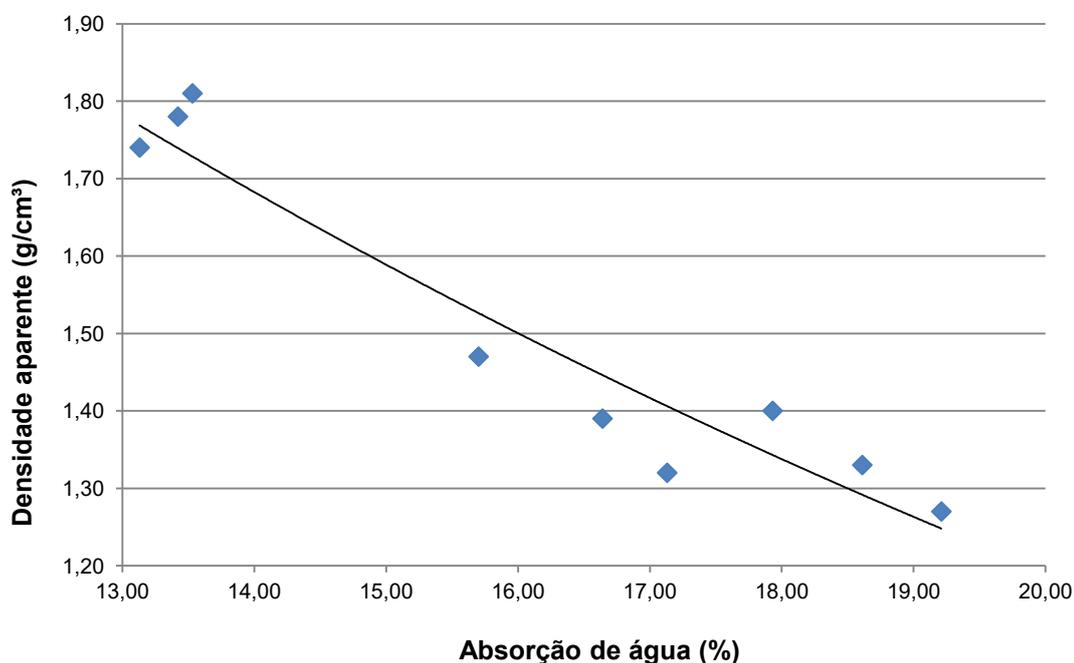
os maiores valores de densidade aparente encontram-se nas amostras 1, 4 e 7 que não continham pó de alumínio em sua composição.

Figura 24 - Densidade aparente das argamassas geopoliméricas com 28 dias de cura.



Fonte: Autor, 2017.

Figura 25 - Relação entre densidade aparente e absorção de água das amostras aos 28 dias de cura.

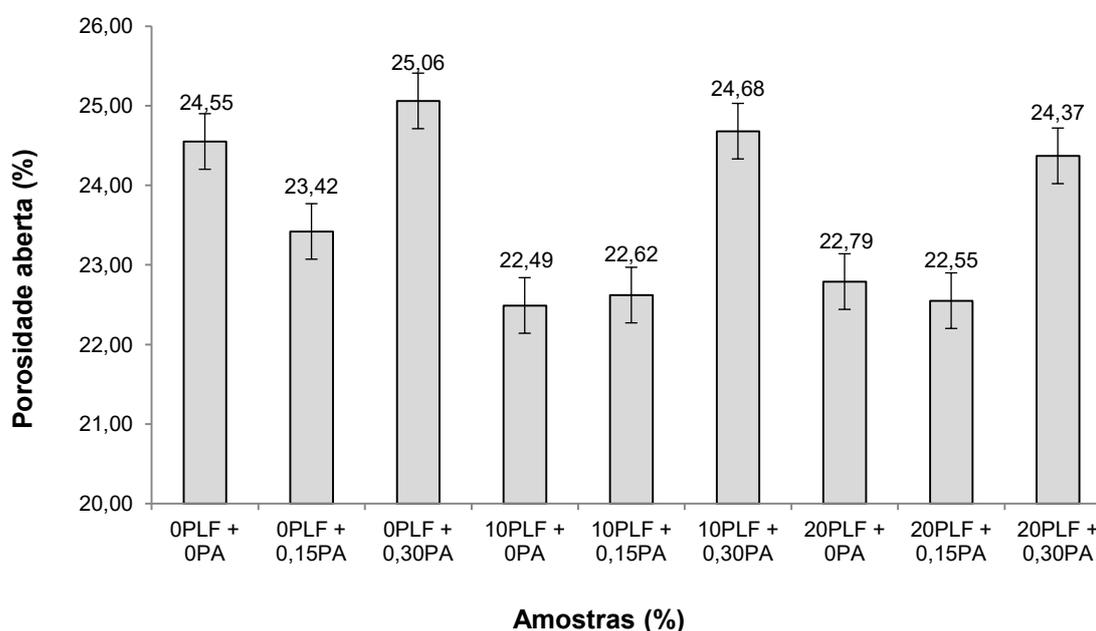


Fonte: Autor, 2017.

Os resultados podem ser aproximados por 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 porosidade aparente (Figura 26) apresentou diversas variações à medida que a quantidade de PA e PLF foram adicionadas. Notou-se que o PLF influenciou diretamente para o decréscimo dos valores da porosidade e a adição do PA gerou o efeito inverso.

Figura 26 - Porosidade aparente das argamassas geopoliméricas aos 28 dias de cura.



Fonte: Autor, 2017.

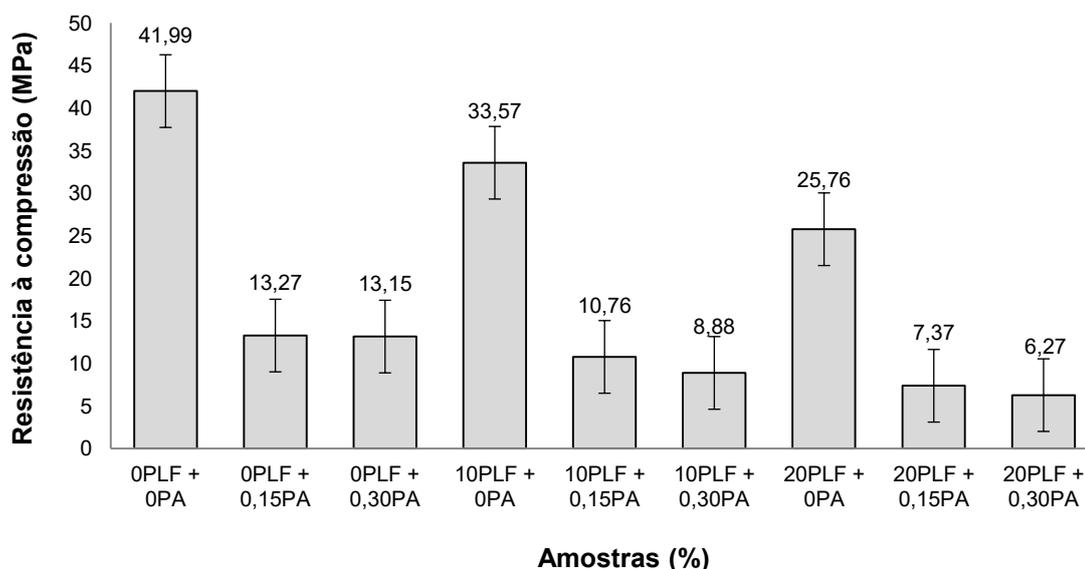
4.6. Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão (Figura 27) foram obtidos após 28 dias de cura, representando o valor médio entre 3 corpos de prova por formulação. Após os ensaios, notou-se claramente que o geopolímero trata-se de um material frágil e seu comportamento é característico do mundo das cerâmicas, do mesmo modo que as argamassas e concretos desenvolvidos a base de cimento Portland. As amostras de referência (0%PA + 0%PLF) obtiveram, como esperado, os maiores valores de resistência, superando os 40 MPa.

Os valores encontrados apresentam, primeiramente, uma disparidade em relação à amostra de referência e as amostras contendo apenas pó de alumínio (70% maior). Posteriormente, notou-se que a adição do PLF também proporcionou um decréscimo de resistência em relação à amostra de referência, entretanto, a disparidade entre elas é consideravelmente menor (20%). O efeito combinado entre o PLF e o PA gerou então, um decréscimo de resistência ainda maior em relação à

primeira formulação. As amostras com 0,30% de PA + 20% de PLF apresentaram valores 85% menores quando comparados a amostra de referência.

Figura 27 - Resistência à compressão das argamassas geopoliméricas aos 28 dias de cura.

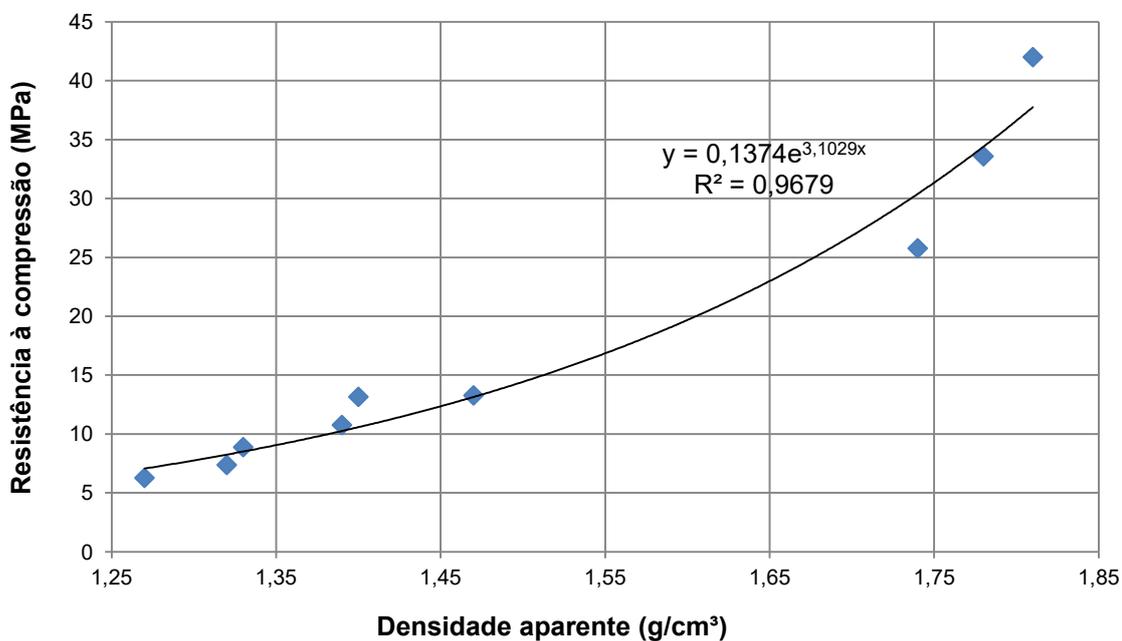


Fonte: Autor, 2017.

A resistência de um material é definida pela equação $\sigma = F/A$, onde σ é a tensão resistida, F é a força aplicada e A é a área onde a força é aplicada. Com isso, temos que a tensão resistida pelo material é inversamente proporcional a área. Levando em consideração que a formação de poros no interior da matriz reduz a área que efetivamente resiste às cargas aplicadas, pode-se afirmar que, com o aumento da quantidade de poros na estrutura, o material passa a ter menor resistência.

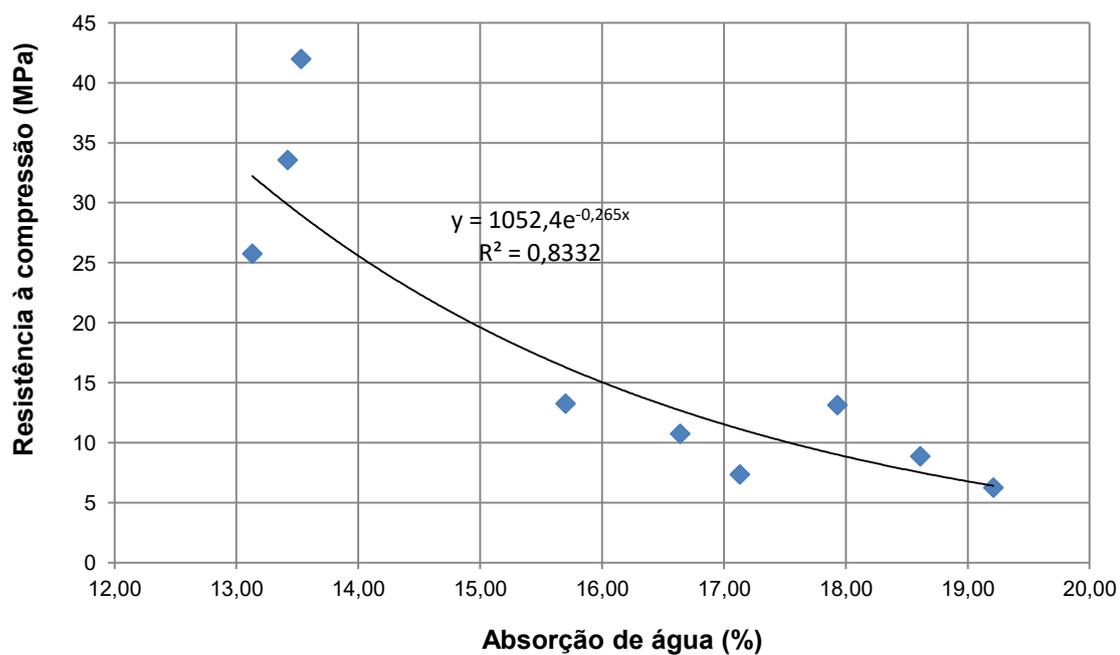
Os valores de resistência à compressão relacionados com a densidade aparente (Figura 28) e com a absorção de água (Figura 29) apresentaram comportamento exponencial e inversamente proporcionais entre eles.

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



Fonte: Autor, 2017.

Figura 29 - Relação entre resistência à compressão e absorção de água das argamassas geopoliméricas aos 28 dias de cura.

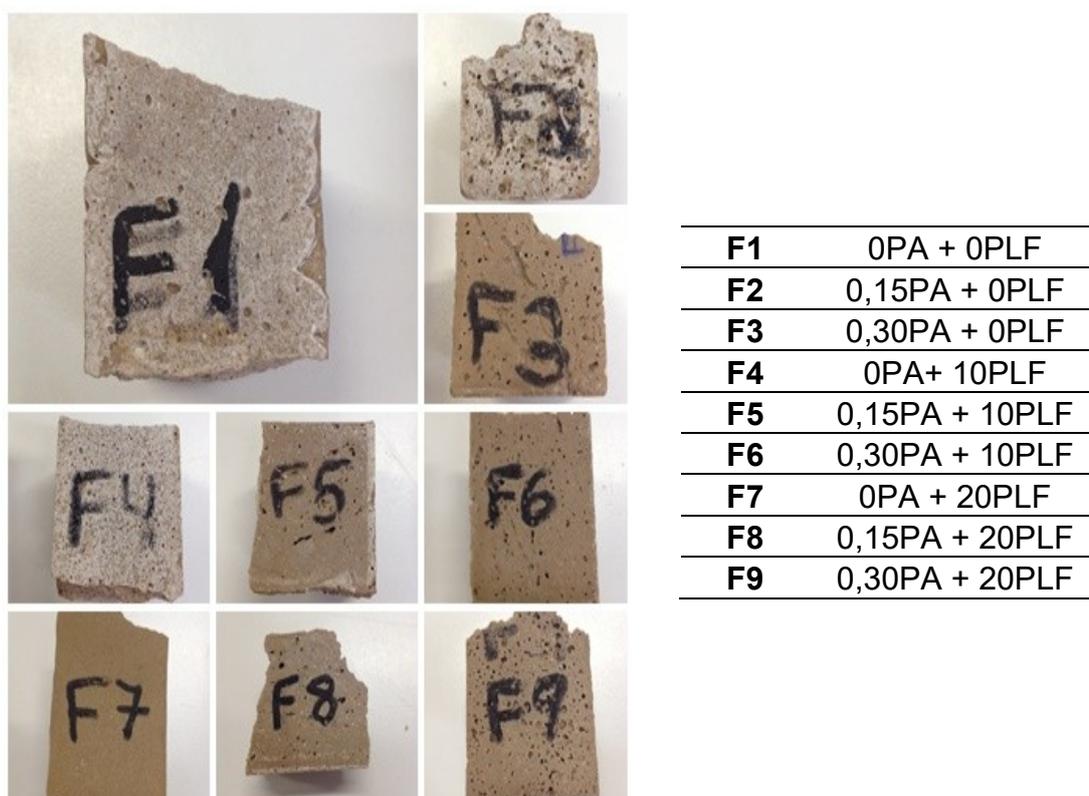


Fonte: Autor, 2017.

Outra particularidade observada se refere à 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. Estes fatores também explicam a queda na resistência das amostras porosas em relação à amostra de referência.

Na Figura 30 são apresentados alguns corpos de prova após serem submetidos ao ensaio de compressão.

Figura 30 - Corpos de prova após o ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autor, 2017.

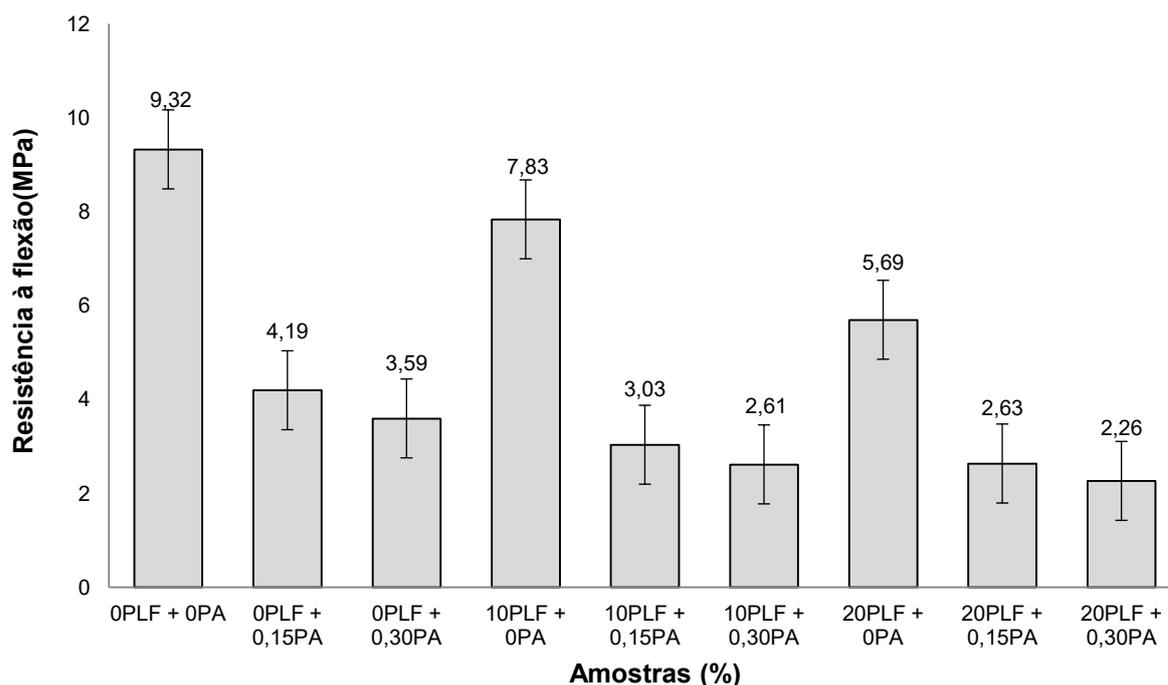
Embora a resistência à compressão tenha reduzido com a adição do PLF, os resultados encontram-se em um bom patamar. Segundo a NBR 6118, tais formulações podem ser aplicadas em estruturas, pois ultrapassam a resistência mínima de 20 MPa. Com a adição conjunta do pó de alumínio esta aplicação não seria mais viável, entretanto, a norma NBR 13438, que diz respeito a blocos de concreto celular classe 45 autoclavado, descreve que a resistência média exigida é 4,5 MPa. Com estes dados chega-se à conclusão que as amostras com 0,15%PA +

20%PLF até 0,30% + 20%PLF estão com uma resistência superior às exigidas para concreto celular e podem ser aplicadas.

4.7. Resistência à flexão

Os valores de resistência à flexão (Figura 31) foram obtidos após 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 9,32 MPa. As amostras com adição exclusiva de PLF obtiveram um decréscimo de 16% e 38,95%, respectivamente, enquanto que o efeito isolado do PA ocasionou uma queda na resistência de 55,04% e 61,48% em relação à amostra de referência.

Figura 31 - Resultado de resistência à flexão das argamassas geopoliméricas aos 28 dias de cura.

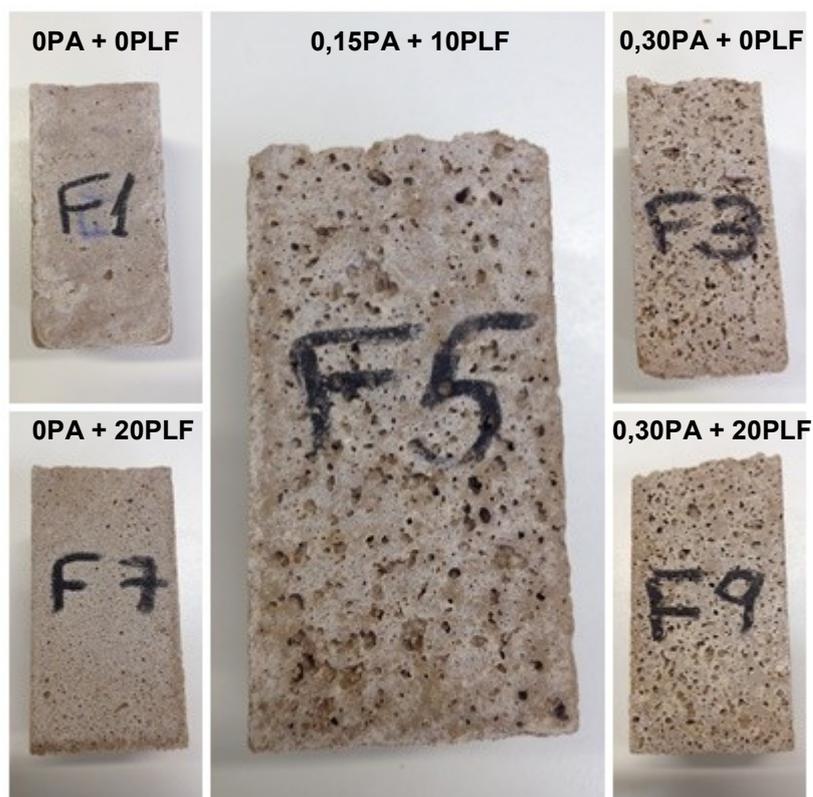


Fonte: Autor, 2017.

Ao comparar os resultados da flexão com a compressão, nota-se que a disparidade entre a referência e os elementos porosos é menor. É importante ressaltar que a resistência à tração na flexão de argamassas a base de cimento Portland são da ordem de $0,3 \times \sqrt{f_{ck}}$, ou seja, para uma amostra de argamassa

com resistência à compressão de 40 MPa tem-se, aproximadamente, uma resistência à flexão de 1,90 MPa. Portanto, a resistência encontrada nas argamassas geopoliméricas contém valores muito maiores que o tradicional. A Figura 32 apresenta corpos de prova após o rompimento por flexão.

Figura 32 - Corpos de prova após o ensaio de resistência à flexão.



Fonte: Autor, 2017.

Do mesmo modo que na compressão, o rompimento dos corpos de prova por flexão não ocorre de forma perpendicular ao eixo. As amostras porosas apresentam maior nitidez em sua heterogeneidade no rompimento, devido à ocorrência de vazios presentes nas amostras e diferentes tamanhos e quantidade de poros na estrutura.

5. CONCLUSÃO

Por meio do ensaio de espalhamento (*flow table*), observou-se que as adições do pó de alumínio e do pó de lâmpada fluorescente proporcionaram um acréscimo na abertura em mesa da argamassa. O pó de alumínio contribuiu para a diminuição da viscosidade devido à redução do atrito interno entre as partículas. O pó de lâmpada fluorescente, por sua vez, teve grande influência no espalhamento das amostras devido ao seu tamanho de partícula e área superficial.

Quanto às propriedades físicas, os resultados apontaram para uma redução na densidade aparente e um aumento na absorção de água à medida que aumentam as frações de PA e PLF nas amostras. Em contra partida, os resultados de porosidade aberta apresentaram uma relação de crescimento a partir da adição do pó de alumínio e um decréscimo com a adição do pó de lâmpada fluorescente.

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 parâmetros de resistência à compressão e flexão apresentaram comportamentos proporcionalmente semelhantes e também foram analisados. Notou-se de forma previamente esperada, que a adição do pó de alumínio proporciona uma queda brusca na resistência das argamassas devido à formação de poros em sua estrutura. Entretanto, a substituição parcial do metacaulim pelo pó de lâmpada fluorescente gerou uma queda de resistência bem menos significativa que o pó de alumínio, pois, tratava-se de um material amorfo e com fonte abundante de sílica.

Devido ao fato de não conter alumina em sua composição, a substituição de 20% do metacaulim pelo PLF fez com que pontos de efluorescência fossem notados na estrutura do material, pois, a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ultrapassou o valor ideal de 4,5. Entretanto, sua aplicação como agente controlador e absorvente de metais pesados não seria restringida por este fenômeno.

Com base no conjunto de resultados obtidos no presente trabalho de pesquisa, pode-se afirmar que é possível utilizar o pó de alumínio como agente formador de poros e o pó de lâmpada fluorescente como fonte de sílica. As amostras apenas com PLF apresentaram resultados satisfatórios e podem ser aplicados de em estruturas, pois, obtiveram resistência mínima definida por norma. As formulações com o agente formador de poros e com seu efeito combinado com o PLF resultaram em resistências menores, porém, superiores as necessárias para aplicações em blocos de revestimento interno, reguladores de ph e absorventes de metais pesados.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

- Analisar a condutividade térmica das amostras;
- Variar a granulometria do agente formador de poros na formação de bolhas;
- Variar a granulometria do pó de lâmpada fluorescente em relação a resistência mecânica do material;
- Adicionar uma fonte de alumina em conjunto com o pó de lâmpada fluorescente;
- Verificar resultados mecânicos com tempos de cura diferentes.

REFERÊNCIAS

BARDINI, I. S; MARCHIORO T. B. **Um estudo exploratório do uso de vidro reciclado como agregado de concretos.** 2007. 42f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Santa Catarina, 2007.

BOCA SANTA, R. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel.** 2012. 135 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina.

CESARI, V. **Influência do uso de aditivos dispersantes em pastas de geopolímero produzido com cinza volante e hidróxido de sódio.** 2015. 128 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

COIMBRA, M. A. **Estudo da influência de cimentos na fluência em concretos para a construção civil.** 2006. 104 f. p. 102.

CRISIGIOVANNI, C. L. M. **Uma abordagem sócio-ambiental e tecnológica da reciclagem dos resíduos de vidro.** 2010, 88f. Dissertação (Mestrado Profissional do Programa de Pósgraduação em Desenvolvimento de Tecnologia) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2010.

DAVIDOVITS J. **Geopolymers: inorganic polymeric new materials.** J Therm Anal 1991;37:1633–56.

DAVIDOVITS J. **Properties of geopolymer cements.** Geopolymer institute. Alkline Cements and Concretos, KIEV Ukraine, 1994, p, 2.

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

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Cement, a review**, Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France, 2013. Disponível em: <<http://www.geopolymer.org/library/technical-papers/21-geopolymer-cement-review-2013>>. Acesso julho/2013.

FENG, DINGWU; PROVIS, JOHN L. AND VAN DEVENTER, JANNIE S. J. **Thermal Activation of Albite for the Synthesis of One-Part Mix Geopolymers.** Journal Am. Ceram. Soc., vol.95 [2], 565–572, 2012.

FERNÁNDEZ - JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; REVUELTA, D. **Alkali activation of industrial by-products to develop new earth-friendly cements.** Proceeding of the 11th International Conference on Non-Conventional Materials And Technologies (NOMAT 2009). Bath, Reino Unido: 2009.

FONTA, P. 2013. **New data for cement industry shows reductions in CO2 emission.** World Cement.

Geopolymer Concrete Airport and Eco-Building. Disponível em: <<https://www.geopolymer.org/news/visit-airport-eco-building/>>. Acesso em: 26 de Setembro de 2016.

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

HARTMANN, E. **Argamassa geopolimérica utilizando pó de alumínio como agente formador de poros.** 2016. 54 f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina.

JÚNIOR, Walter Alves Durão. WINDMÖLLER, Cláudia Carvalhinho. A Questão do Mercúrio em Lâmpadas Fluorescentes. Química Nova na Escola, n° 28, MAIO 2008.

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

LI, C. ; SUN, H.; LI, L. **A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements**, Cem. Conc. Res., vol. 40 ,p.1341–1349, 2010.

LOPES, D. A. R; AZEVEDO, C. A. P.; BARBOSA NETO, E. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino**. Cerâmica [online]. 2005. Vol. 51, n. 320, pp. 318-324. ISSN 0366-6913.

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.

MONTE, M. B. M; PAIVA, P. R. P; TRIGUEIRO, F. E. **Técnicas Alternativa para Modificação do Caulim**. Rio de Janeiro: Cento de Tecnologia Mineral (CETEM), Série Rochas e Minerais Industriais, Vol 8, 50 p., 2003.

NETTO, R. M. **Materiais Pozolânicos**. 2006. 149f. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. Disponível em <http://www.cecc.eng.ufmg.br/trabalhos/pg1/MonografiaMateriais_Pozolanicos.pdf>. Acesso em: 18 nov.2016.

NOVAIS, Rui M. et al. **Influence of blowing agent on the fresh- and hardened-state properties of lightweight geopolymers**. Journal elsevier. v. 108. p. 551-559, 2016.

NOVAIS, R.M; ASCENSÃO, G; SEABRA, M.P; LABRINCHA J.A. **Waste glass from end-of-life fluorescent lamps as raw material in geopolymers**. Department of Materials and Ceramic Engineering/CICECO – Aveiro Institute of Materials, University of Aveiro, Aveiro, Portugal, 2016.

OLIVEIRA, C.A. **Avaliação microestrutural e comportamento físico e mecânico de concretos de alto desempenho produzidos com metacaulim.** 2007. 214 f. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais.

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

PINTO, A.T. **Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina do Metacaulino.** Tese Doutorado, Universidade do Minho, Portugal. 2004.

PINTO, A.T. **Introdução ao Estudo dos Geopolímeros.** Editora UTAD, Portugal, 105 p., 2006.

PINTO, E. N. M.G. **Ativação de pastas geopoliméricas com tetraborato de sódio e látex não iônico para cimentação de poços de petróleo.** 2007. 96f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

POLANCO, S. L. C. **A situação da destinação pós-consumo de lâmpadas de mercúrio no Brasil.** 2007. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos químicos e bioquímicos) – Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2007.

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

ROCHA, G. G. N.; VASCONCELOS, W. L. **Caracterização Microestrutural do Metacaulim de Alta Resistência.** Revista Concreto. Nº 42, p. 98 -106, 2006.

SILVA, S.P., **Geologia do Caulim**, 2a ed., Belém: DNPM 5º DS/DNPM,p.18, 1993.

SILVA, F. J. **Reforço e Fratura em Compósitos de Matriz Álcali-ativada**. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) Instituto Militar de Engenharia, p. 271, Rio de Janeiro, 2000.

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

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

SKAF, T. **Influência de matérias-primas na microestrutura e resistência de compósitos geopoliméricos**. 2008. 118 f. Dissertação de mestrado em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia.

SONAFRANK, GH COLE, **investigating century cement production . Cold Climate**. Housing Research Center (CCHRC). Alaska, p.114, 2010.

TORGAL, F.P.; CASTRO-GOMES, J.P.; JALALI,S. **Cimento Portland Normal Versus Ligantes Geopoliméricos: Considerações Econômicas Sobre as Implicações do Mercado do Carbono no Custo dos Betões**. Instituto Politécnico de Castelo Branco, Portugal, 2005.

TORGAL, F.P; JALALI,S. **Cimento Portland normal versus ligantes geopoliméricos: Durabilidade e desempenho ambiental**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.15, p.1-9, Abril, 2010.

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

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

ZANICHELI, Claudia et al.. **Reciclagem de lâmpadas Aspectos Ambientais e Tecnológicos**. Campinas, PUCC, 2004.