



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Vilson Schwitzky Junior

**DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMEROS LEVES REFORÇADOS COM FIBRAS
DE VIDRO**

Joinville
2022

VILSON SCHWITZKY JUNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMEROS LEVES REFORÇADOS COM FIBRAS
DE VIDRO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Senff
Coorientador: Prof. Dr. Rui Miguel Novais

Joinville

2022

Vilson Schwitzky Junior

**DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMEROS LEVES REFORÇADOS COM
FIBRAS DE VIDRO**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Derce de Oliveira Souza Recouvreux, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Claudimir Antônio Carminatti, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Marcelo Tramontin Souza, Dr.
Universidade Estadual de Santa Cruz

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Luciano Senff, Dr.
Orientador

Joinville, 2022.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Schwitzky, Vilson

Desenvolvimento de geopolímeros leves reforçados com
fibras de vidro / Vilson Schwitzky ; orientador, Luciano
Senff, coorientador, Rui Miguel Novais, 2022.

86 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Geopolímeros
leves. 3. Pastas geopoliméricas. 4. Fibras de vidro. 5. Pó
de alumínio. I. Senff, Luciano. II. Miguel Novais, Rui.
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. IV. Título.

Dedico este trabalho à Deus, à minha amada noiva Milena, meus queridos pais, amigos e colegas de profissão.

AGRADECIMENTOS

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

Aos meus pais, Vilson e Evelin, por todo sustento, apoio e compreensão em todos os anos de graduação e pós-graduação.

À minha amada noiva Milena, aos seus pais, dr.Willy e Mariane, e sua irmã, Maysa, por todo carinho, amor e incentivo 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 professor Dr.Rui Novais, por sua coorientação e direção durante o desenvolvimento do presente estudo.

O autor é grato pela infraestrutura do Laboratório de Ensaios Mecânicos do centro CEPLAN/UDESC, vinculado ao Centro Multiusuário do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina (CMU/CCT/UDESC).

Ao Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica (DEMaC) da Universidade de Aveiro, em Portugal.

À empresa ALCOA pela doação do pó de alumínio atomizado utilizado nesta pesquisa.

À Empresa Metacaulim do Brasil pela doação do metacaulim utilizado nesta pesquisa.

A toda minha família, amigos e colegas de profissão que estiveram ao meu lado em todos os momentos.

Clame a mim e eu responderei e direi a
você coisas grandiosas e insondáveis que
você não conhece.

(Jeremias 33.3)

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 polímeros inorgânicos ou geopolímeros, que são materiais que, quando submetidos a soluções alcalinas, endurecem devido à polimerização. As matérias primas para a produção dos geopolímeros são provenientes de composições químicas ricas em sílica e alumina. O desenvolvimento desses materiais tem ganhado espaço no cenário mundial das pesquisas nos últimos anos, principalmente pela proposta menos poluente em sua produção e aplicações como materiais leves e multifuncionais através da incorporação de poros na estrutura. Em contrapartida, a formação porosa dessa matriz gera uma queda brusca em sua resistência mecânica. Dessa forma, a introdução de fibras para reforço aparece como uma interessante alternativa para a viabilidade do uso desses elementos na construção civil. Nesta pesquisa, será utilizado o metacaulim como fonte principal de aluminossilicato, enquanto a adição do pó de alumínio em diferentes granulometrias terá a função de um agente formador de poros. A solução ativadora alcalina será composta pelo hidróxido de sódio juntamente com o silicato de sódio. As fibras de vidro serão adicionadas com o intuito de reforço para as pastas geopoliméricas. Os resultados demonstram que o pó de alumínio em sua granulometria fina e o seu efeito, quando comparado com o pó de alumínio grosso, contém influência direta na porosidade, consistência, densidade e resistência mecânica. Dessa forma, pastas geopoliméricas porosas reforçadas com fibras foram produzidas e valores de resistência à flexão aos 28 dias de curas alcançaram 0,93 MPa com valores de densidade de 0,38 g/cm³ e maior valor de capacidade de absorção de água (110,13%). Em relação à condutividade térmica, o menor valor encontrado está alinhado com a amostra 0,35P.A+0,5Fb, resultando em 106,09 mW/mK, mostrando que o pó de alumínio, juntamente com a incorporação das fibras de vidro como reforço, podem ser utilizados em aplicações que requeiram materiais leves, isolantes térmicos e multifuncionais.

Palavras-chave: Geopolímeros leves, Pó de alumínio, Fibras de vidro, Resistência à flexão.

ABSTRACT

The focus on sustainable development has motivated a collective effort from all countries to seek alternatives to reduce the environmental impact of civil construction. This is especially critical since the production of Portland cement is one of the main causes of CO₂ emissions in the atmosphere. Among these alternatives, inorganic polymers or geopolymers are of particular interest since they are materials that harden due to polymerization when exposed to alkaline solutions. The raw materials for the production of geopolymers come from chemical compounds rich in silica and alumina. Worldwide research and development of these materials has accelerated in recent years since they present a less polluting option in their production and has a light and multifunctional characteristic due to the presence of pores in their structure. However, the same porous structure of the matrix generates a sharp drop in mechanical strength. Thus, techniques such as the introduction of fibers for reinforcement are used to increase the usability of these elements in civil construction. In this study, metakaolin was proposed as the main source of aluminosilicate, while the addition of aluminum powder in different particle sizes had the function of a pore-forming agent. The alkaline activating solution was composed of sodium hydroxide mixed with sodium silicate. Glass fibers were added in order to reinforce the geopolymeric pastes. Results demonstrated that the fine or coarse granulometry of aluminum powder had a direct effect on porosity, consistency, density and mechanical strength. Reinforced porous geopolymeric pastes presented flexural strengths of up to 0.93 MPa at 28 days of curing with density values of 0.38 g/cm³ and higher water absorption capacity value (110,13%). Regarding thermal conductivity, the lowest value found is in line with the sample 0.35P.Af+0.5Fb, resulting in 106,09 mW/mK. This demonstrated that aluminum powder geopolymers, with the incorporation of glass fibers as reinforcement, can be used in applications that require light materials, thermal insulation or multifunctional use.

Keywords: Lightweight-geopolymers, Aluminum powder, Glass fibers, Flexural strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática dos polissialatos	26
Figura 2 - Representação esquemática dos polissialatos	26
Figura 3 - Amostras comerciais de metacaulim.....	29
Figura 4 - Trabalhos publicados sobre geopolímeros	31
Figura 5 - Trabalhos publicados sobre geopolímeros leves.	32
Figura 6 - Concreto Celular	33
Figura 7 - Aplicações dos geopolímeros segundo sua estrutura molecular.	36
Figura 8 - Aplicações dos geopolímeros na construção civil.	36
Figura 9 – Procedimentos e ensaios para caracterização das pastas geopoliméricas	38
Figura 10 - Materiais utilizados na produção de geopolímeros porosos reforçados com fibras: a) Pó de alumínio (fino); b) Pó de alumínio (grosso); c) Metacaulim, d) Surfactante, e) Fibras de vidro; f) Solução NaOH (10 M); g) Silicato de sódio.....	40
Figura 11 - Distribuição granulométrica do pó de alumínio	43
Figura 12 - Fibra de vidro comercial - MM fibras para concreto	44
Figura 13 - Fluxograma de elaboração dos corpos de prova	47
Figura 14 - Equipamentos utilizados para a preparação das pastas geopoliméricas:	47
Figura 15 - Ensaios de Arquimedes: a) Massa seca; b) Massa imersa; c) Massa saturada com superfície seca.....	49
Figura 16 - Microscópio ótico com câmera digital acoplada - Leica EZ4HD	50
Figura 17 - Representação de captação de dados de condutividade térmica	52
Figura 18 - Equipamento para realização de ensaios mecânicos	53
Figura 19 - Ensaio de resistência à tração na flexão.....	54
Figura 20 - Ensaio de resistência à compressão.....	54
Figura 21 - Densidade aparente das amostras geopoliméricas aos 28 dias de cura	57
Figura 22 – Estrutura porosa dos corpos de prova geopoliméricos	57
Figura 23 – Características visuais das amostras com diferentes proporções de pó de alumínio aos 28 dias de cura.....	58
Figura 24 - Pós de alumínio adicionados à mistura geopolimérica porosa: a) Pó de alumínio com granulometria fina; b) Pó de alumínio com granulometria grossa	59

Figura 25 – a) Aglomerações na matriz geopolimérica causadas pela presença das fibras de vidro; b) Ampliação do ponto com aglomerações.....	59
Figura 26 - Absorção de água das amostras geopoliméricas aos 28 dias de cura. ..	60
Figura 27 - Relação entre densidade aparente e absorção de água das amostras após 28 dias de cura.....	61
Figura 28 - Amostras primáticas (4 cm x 16 cm) com diferentes teores de pó de alumínio na granulometria fina	62
Figura 29 - Amostras primáticas (4 cm x 16 cm) com diferentes teores de pó de alumínio na granulometria grossa	64
Figura 30 - Análise microscópica das amostras geopoliméricas: a) 0,00 PA+0,0 Fb; b) 0,30 PA _f +0,0 Fb; c) 0,30 PA _g +0,0 Fb	65
Figura 31 - Resistência à tração na flexão das amostras geopoliméricas aos 28 dias de cura	67
Figura 32 - Análise das fibras de vidro nas amostras geopoliméricas porosas verificadas a partir de imagens do microscópio óptico	68
Figura 33 - Direção das fibras de vidro na matriz geopolimérica 0,35PA _f +0,5 Fb.....	69
Figura 34 - Propagação das trincas após rompimento das amostras	70
Figura 35 - Resistência à Compressão das amostras geopoliméricas aos 28 dias de cura	71
Figura 36 - Relação entre densidade aparente e a resistência à tração na flexão das amostras após 28 dias de cura.	73
Figura 37 - Relação entre densidade aparente e a resistência à compressão das amostras após 28 dias de cura.	74
Figura 38 - Resultados do ensaio de condutividade térmica das amostras geopoliméricas aos 28 dias de cura	75
Figura 39 - Relação entre a condutividade térmica e a densidade aparente das amostras geopoliméricas aos 28 dias de cura.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química da argila caulinitica e do caulim teórico	28
Tabela 2 - Razões ideais para formulações de Geopolímeros	30
Tabela 3 - Composição química do metacaulim.....	41
Tabela 4 - Características do hidróxido de sódio	41
Tabela 5 - Composição química do silicato de sódio	41
Tabela 6 - Nomenclaturas dos pós de alumínio	42
Tabela 7 - Informações técnicas dos diferentes pós de alumínio.....	42
Tabela 8 - Características das fibras de vidro	43
Tabela 9 - Parâmetros fixados para a pasta de referência.....	45
Tabela 10 - Formulações utilizadas para o desenvolvimento de geopolímeros porosos	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al – Alumínio
 Al_2O_3 – Óxido de Alumínio
ASTM – *American Society for Testing And Materials*
CaO – Óxido de Cálcio
C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado
 CO_2 – Dióxido de Carbono
CP – Corpo de Prova
DRX – Difração por raio-X
DTP – Distribuição Total das Partículas
Fb – Fibras de vibro
Fck – Resistência característica do concreto à compressão
K – Caulinita
KOH – Hidróxido de Potássio
L - Mica
M - Molar
MK – Metacaulim
NaOH – Hidróxido de Sódio
 Na_2SiO_3 – Silicato de Sódio neutro
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora
PA – Pó de alumínio
 PA_f – Pó de alumínio com granulometria fina
 PA_g – Pó de alumínio com granulometria grossa
REF – Referência
Si – Silício
 SiO_2 – Óxido de Silício
S/L – Razão sólido/líquido

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	21
1.1.	OBJETIVOS	23
1.1.1.	Objetivo Geral	23
1.1.2.	Objetivos Específicos	23
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1.	ESTADO DA ARTE	25
2.2.	METACALIM	27
2.3.	ATIVADORES ALCALINOS	29
2.4.	GEOPOLÍMEROS LEVES	31
2.5.	REFORÇO COM FIBRAS	34
2.6.	APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL	35
3.	METODOLOGIA	37
3.1.	MATERIAIS	38
3.2.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	44
3.2.1.	Definição e produção das amostras	44
3.2.2.	Ensaio no estado endurecido	48
3.2.2.1.	Caracterização das propriedades físicas.....	48
3.2.2.2.	Condutividade Térmica.....	50
3.2.2.3.	Resistência à tração na flexão e à compressão	52
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS	56
4.1.1.	Densidade aparente	56
4.1.2.	Absorção de água	59
4.2.	MORFOLOGIA DOS POROS.....	61
4.3.	ENSAIOS MECÂNICOS	66
4.3.1.	Resistência à tração na flexão	66
4.3.2.	Resistência à compressão	71
4.4.	CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	74
5.	CONCLUSÃO	78
5.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	79
	REFERÊNCIAS	81

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, 2016a). 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 Davidovits em 1978, os geopolímeros têm se tornado uma solução inovadora e eficiente, visto que seu comportamento se assemelha 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 obtidas 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 a 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, 2016). Em aplicações em 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 materiais leves e multifuncionais, gerando sustentabilidade.

A reutilização de materiais contribui para a minimização dos impactos ambientais gerados por sua eliminação inadequada. Os resíduos empregados possuem características dependentes da sua composição química, origem, e tamanho de partículas, que podem alterar a resistência, no caso das fibras de reforço, e no tempo de pega, trabalhabilidade e porosidade do material, no caso do pó de alumínio.

Recentemente, a produção de geopolímeros leves (também conhecidos como polímeros inorgânicos) atraiu ainda mais a atenção dos pesquisadores que desejam obter um novo material de construção “sustentável” ou “verde” em comparação com o concreto à base de cimento. Este material surgiu em resposta as preocupações com o consumo global de energia, pois, segundo as perspectivas internacionais de energia realizadas em 2016, esse aumento será de 48% entre 2012 e 2040 (U.S Energy Information Administration, 2016). Nesse período, segundo o mesmo estudo, as emissões de CO₂ relacionadas a energia também aumentarão 24% . Os edifícios são o maior setor consumidor de energia, representando 30-40% do consumo mundial de energia (B. LIN, 2015), cuja demanda por energia deve crescer quase 58% até 2050 (P. NEJAT, 2015).

Para reverter esse cenário não sustentável, foram adotados quadros de políticas com relação ao desempenho energético dos edifícios. Este setor é considerado uma das maiores fontes de economia de energia e potencial de redução de CO₂ (D. STANIASZEK, 2013). De fato, o aquecimento e o resfriamento de ambientes são os principais usos finais de energia nos edifícios e podem ser altamente reduzidos, melhorando a eficiência energética dos materiais de revestimento dos edifícios (S. BARBHUIYA, 2013). Levy et al. (2016) cita que uma opção atraente é a incorporação de materiais de isolamento térmico que reduzem significativamente o consumo de energia e aumentam a eficiência energética dos edifícios. Geopolímeros leves emergem como uma alternativa aos convencionais materiais de baixa condutividade térmica devido ao desempenho e vantagens ambientais (NOVAIS, 2016b).

Geopolímeros de baixa condutividade térmica (até 107 mW/mK) foram relatados recentemente pelos autores, usando peróxido de hidrogênio como agente de expansão (NOVAIS, 2016c) gerando poros de tamanho grande e uma distribuição desigual de tamanho de poro. Trabalhos com a adição do pó de alumínio como agente formador de poros também foram realizados (KLETTENBERG, 2018) e apesar da melhor distribuição e uniformidade dos poros na estrutura, inevitavelmente, a resistência mecânica dos materiais reduziu consideravelmente. Sendo assim, a introdução de fibras como reforço para as pastas geopoliméricas aparecem como uma interessante alternativa para aumentar a aplicabilidade no material na construção civil.

Neste contexto, e com base nas vantagens do uso de geopolímeros, este trabalho concentra-se na elaboração de pastas prismáticas feitas a partir de metacaulim como fonte de aluminossilicato, introdução de diferentes granulometrias de pó de alumínio (PA) como agente formador de poros, e adição de fibras de vidro (Fb) para reforço estrutural.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver e caracterizar as propriedades físicas e mecânicas de pastas geopoliméricas leves formadas a partir da introdução de pó de alumínio (como agente formador de poros) em diferentes proporções e granulometrias e adição de fibras de vidro como reforço estrutural mecânico.

1.1.2. Objetivos Específicos

Entre os objetivos específicos, pode-se citar:

- Analisar a influência da dosagem e da granulometria de pós de alumínio em pastas geopoliméricas porosas
- Avaliar a influência das diferentes concentrações de fibra de vidro como agente de reforço do geopolímero poroso através de ensaios resistência à flexão e à compressão.

- Analisar o desempenho das pastas geopoliméricas em termos de propriedades físicas (densidade aparente, absorção de água e porosidade) e mecânicas (resistência à compressão e flexão), além da condutividade térmica, todos aos 28 dias de cura;
- Analisar os aspectos da morfologia dos poros e suas correlações com as propriedades de interesse estudadas neste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Davidovits (2002), 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 multifuncional e suas aplicações na construção civil.

2.1. ESTADO DA ARTE

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, 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.

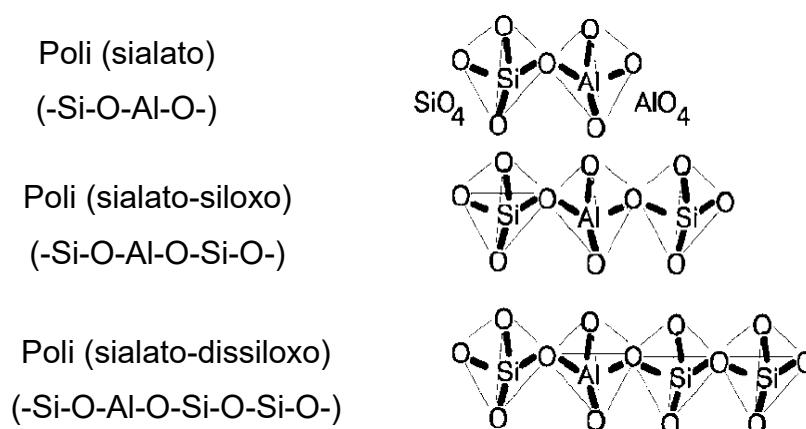
Segundo Vassalo (2013), convencionalmente geopolímeros são sintetizados a partir de uma mistura constituída por uma solução alcalina (frequentemente silicato solúvel) e materiais sólidos de aluminossilicato. A geopolimerização ocorre em duas etapas, primeiramente ocorre a dissolução da sílica e da alumina 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 (1994), 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 geossíntese induz o alumínio por ativação alcalina em uma estrutura de matriz silicosa (SILVA, 2000).

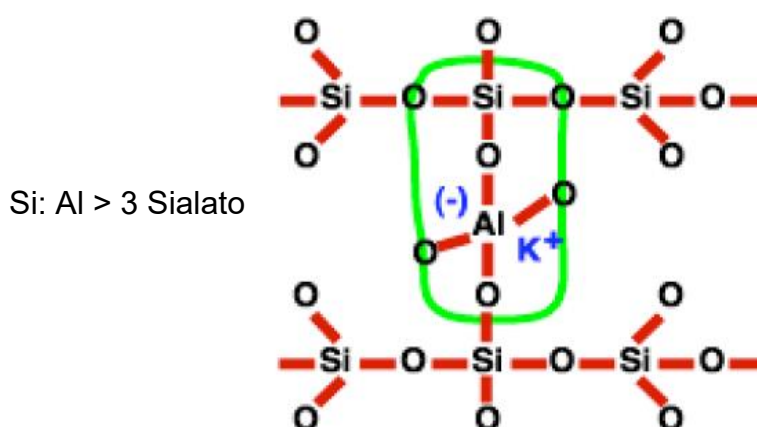
A representação dos arranjos tridimensionais é proporcionada pela razão entre os átomos de silício e alumínio, sendo eles classificados em três denominações: Poli (sialato) com razão Si/Al=1, Poli (sialato-siloxo) com razão Si/Al=2, e Poli (sialato-dissiloxo) com razão Si/Al=3, conforme mostrado nas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

Figura 1 - Representação esquemática dos polissialatos



Fonte: Davidovits (1994).

Figura 2 - Representação esquemática dos polissialatos



Fonte: Davidovits (1994).

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 (2006), 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 $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, 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 caulínicas, cujos teores de caulim, em geral, situam-se acima de 50% (ROCHA, 2005). A composição química da argila caulínica e do caulim apresentadas na Tabela 1.

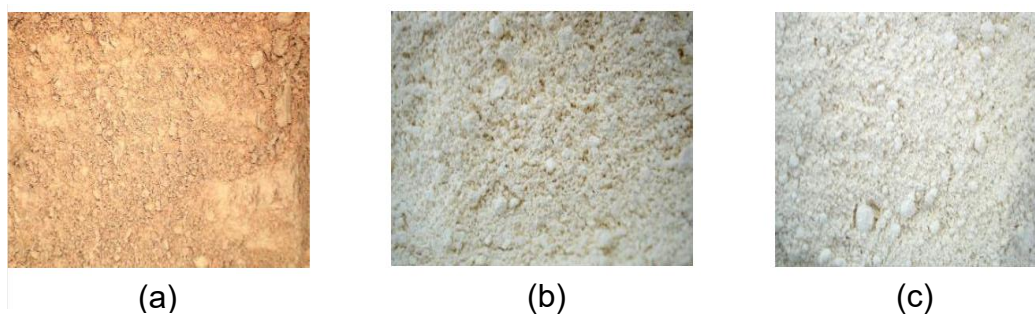
Tabela 1- Composição química da argila caulínica e do caulim teórico

Composto	Argila Caulínica Típica	Caulim Teórico
SiO ₂	>40,0% e <60,0%	46,54%
Al ₂ O ₃	>25,0% e <45,0%	39,50%
FeO ₃	<0,8%	-
Na ₂ O	<0,1%	-
K ₂ O	<3,0%	-
TiO ₂	<1,0%	-
CaO	<1,0%	-
H ₂ O	>8,0% e <18,0%	13,96%
Outros	<1,0%	-

Fonte: Netto (2006).

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 mostradas 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 Vasconcelos (2013, p. 101).

Percebe-se, conforme citado anteriormente, uma distinção na coloração dos materiais, possivelmente ocasionado pelas diferentes quantidades de óxido de ferro na composição química dos materiais. Segundo Rocha e Vasconcelos (2013), 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 ALCALINOS

A ativação alcalina ou geopolimerização é um processo definido por Davidovits (2013) 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 Fernández (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 molar.

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.

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

- Primeiro estágio: destruição-coagulação;

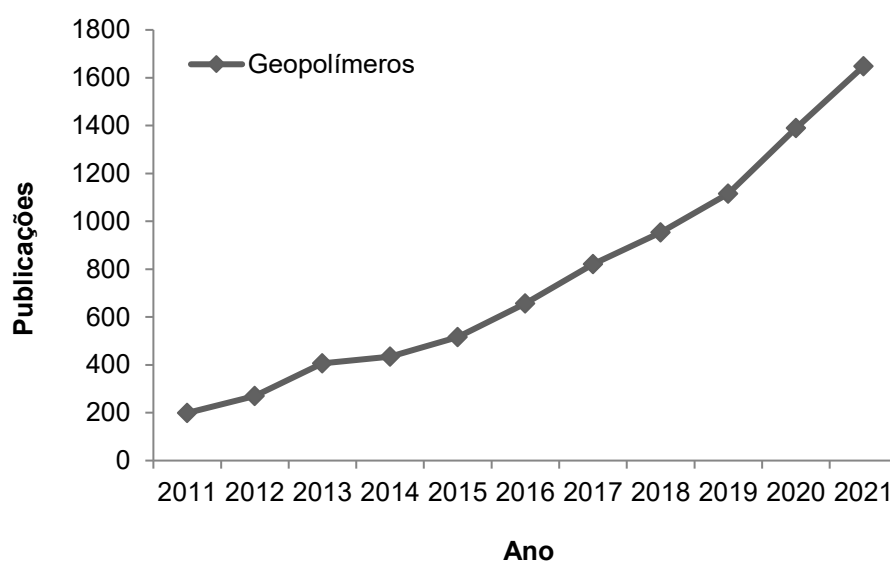
- Segundo estágio: coagulação-condensação;
- Terceiro estágio: condensação-cristalização.

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

2.4. GEOPOLÍMEROS LEVES

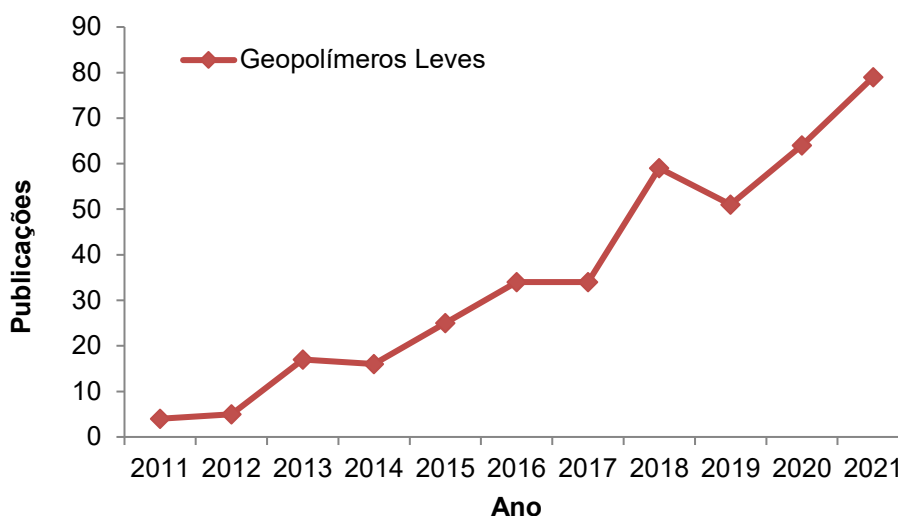
Tendo em vista a enorme utilização do cimento Portland nas indústrias da construção civil e a falta de normatizações para argamassas e concretos geopoliméricos, uma alternativa para a implementação dos geopolímeros de forma efetiva seria o estudo de novas aplicações baseadas em geopolímeros leves. Nos últimos anos, diversos estudos vêm ganhando espaço em atmosfera global na área dos materiais geopoliméricos. As Figuras 4 e 5 apresentam os diversos trabalhos publicados a respeito de geopolímeros e geopolímeros leves. Os respectivos dados foram obtidos em dezembro de 2021, em pesquisa realizada na base de dados Scopus, utilizando as palavras-chaves “Geopolymer” e posteriormente “Lightweight-geopolymer”.

Figura 4 - Trabalhos publicados sobre geopolímeros



Fonte: Scopus, 2021.

Figura 5 - Trabalhos publicados sobre geopolímeros leves.



Fonte: Scopus, 2021.

A capacidade dos materiais de interagir com o ambiente interno dos edifícios é crucial para melhorar a sustentabilidade da indústria da construção civil. Versatilidade e novas funcionalidades dos materiais permitem amplas aplicações industriais em todo o mundo (SEFFF, 2020). Condutividade térmica, isolamento acústico e controle de umidade relativa dentro da sala podem ser citados como alguns exemplos. A argamassa de revestimento à base de cimento pode modular os parâmetros mencionados, dependendo da natureza e das estruturas internas dos poros. Perlita, vermiculita, diatomita, polímeros superabsorventes, olefinas e pós de alumínio são provavelmente os aditivos leves mais populares usados em pastas e argamassas tradicionais para obter tais benefícios (SEFFF, 2016).

A geração de poros é proveniente das reações exotérmicas com a produção de gás de hidrogênio que promovem bolhas nas superfícies do alumínio (Al). A oxidação do Al em solução alcalina se dá pela redução de íons H^+ contidos na água formando hidrogênio gasoso (H_2), implicando na produção de geopolímeros porosos (NGOULOURE et al., 2015).

A ação do Al para gerar poros nos geopolímeros é limitada com o tempo e pela concentração do metal na matriz, o qual influencia o grau de polimerização/reactividade no geopolímero (NGOULOURE et al., 2015).

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 pasta geopolimérica. A incorporação destes agentes interfere na geopolimerização, consistência e resistência dos materiais formados (NOVAIS, 2016b).

O concreto com a incorporação de pó de alumínio pode ser chamado de concreto celular, que é um tipo de concreto produzido através da mistura de cimento, cal e areia (componentes comuns da argamassa) com pó de alumínio que, através de cura e reações químicas, se expande formando poros, deixando a matriz geopolimérica mais leve, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Concreto Celular



Fonte: Gruppi Concreto (2016).

No entanto, um controle preciso do comportamento físico e químico do material desenvolvido é de extrema importância para explorar completamente as vantagens da tecnologia presente nos geopolímeros. A espuma mecânica e química é descrita na literatura, como métodos usuais aplicados à introdução de vazios de ar na pasta alcalina. No caso de espuma química, a solução alcalina é um meio adequado para a reação de alumínio e subsequente geração de hidrogênio (MADDALENA, 2018). O gás produzido introduz vazios na mistura da pasta, desenvolvendo assim uma estrutura matricial porosa.

A aplicação mais trivial baseia-se na utilização deste material como isolante térmico devido a suas características de leveza e resistência ao fogo que possuem um grande atrativo comercial (NOVAIS, 2016b). A utilização destes materiais com o propósito de atuar como filtros para tratamentos de efluentes também foi estudada por Rui Novais (2016a). As vantagens dos geopolímeros neste tipo de aplicação são o

maior tempo de atuação e a fácil remoção dos materiais após o seu uso. Materiais geopoliméricos com função corretora de pH também podem ser citados como aplicações inovadoras destas pesquisas.

Todavia, a produção de corpos de prova geopoliméricos porosos levará inevitavelmente a uma redução considerável na resistência mecânica das espumas (NOVAIS, 2016b). Uma abordagem interessante para limitar essa queda mecânica pode ser o uso de fibras.

2.5. REFORÇO COM FIBRAS

Além da característica de menores taxas de carbono emitidos na atmosfera, os geopolímeros mostram outras vantagens sobre o cimento Portland, como maior resistência a ataques de ácidos e ciclos de congelamento/descongelamento. Apesar dessas propriedades interessantes, os geopolímeros são quebradiços sob força aplicada e, quando porosos, possuem resistência à compressão e flexão relativamente baixas.

Para superar essa limitação, várias fibras foram estudadas como agentes de reforço, como aço e vidro (AL-MAJIDI et al., 2017), algodão (ALOMAYRI et al., 2014), lã (ALZEER E MACKENZIE, 2012), polietileno (NEMATOLLAHI et al., 2017) e linho (ASSAEDI et al., 2015). Apesar do crescente interesse em geopolímeros, o número de investigações sobre geopolímeros reforçados é escasso, em comparação com o concreto comum de cimento reforçado com fibra. Alzeer e Mackenzie, 2012 relataram uma melhoria de 40% na resistência à flexão do geopolímero reforçado com lã em comparação com a matriz não reforçada, enquanto Assaedi et al. (2015) observaram um aumento de 369% na resistência à compressão ao usar um geopolímero de cinza volante reforçado com tecido de linho (correspondente a 4,1% em peso de fibras de linho). Esses estudos demonstram que os geopolímeros reforçados com fibra exibem propriedades mecânicas aprimoradas que podem estender a sua faixa de aplicação.

O uso de fibra de vidro em geopolímeros é menos comum, apesar de sua óbvia adequação (por exemplo, alta resistência à tração e módulo específico) (YAN et al., 2016). Além disso, a literatura existente não é clara: alguns estudos relatam uma queda na resistência mecânica (NEMATOLLAHI et al., 2014), outras pequenas

alterações (AL-MAJIDI et al., 2017) ou melhora significativa (NATALI et al., 2011) quando usando fibra de vidro.

Nematollahi et al. (2014) observaram um ligeiro aumento na resistência à compressão usando fibras de 0,5 e 1,25% em volume, enquanto as composições contendo 0,75 e 1,00% em volume apresentaram comportamento oposto. Al-Majidi et al. (2017) afirmaram que a adição de 1% em volume de fibra de vidro a uma matriz de geopolímero não alterou significativamente a resistência à compressão, enquanto Natali et al. (2011) relataram um aumento de 30% na resistência à flexão ao usar 1% em peso.

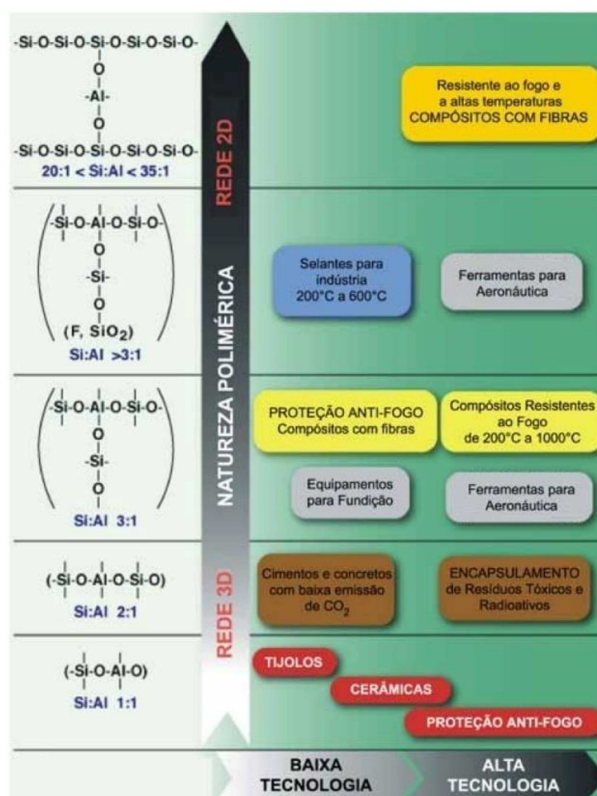
A razão para esses resultados não foi suficientemente abordada pelos autores e, por esse motivo, são necessários estudos adicionais considerando o uso de fibras de vidro para fornecer um conhecimento mais profundo sobre a influência das fibras de vidro (conteúdo, comprimento e razão de aspecto) nas propriedades do geopolímero.

2.6. APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Embora a utilização dos concretos e cimentos geopoliméricos ainda restringir-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 em 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 furacões. As Figuras 7 e 8 apresentam algumas dessas aplicações apresentadas por Davidovits conforme sua estrutura.

Figura 7 - Aplicações dos geopolímeros segundo sua estrutura molecular.



Fonte: Geo-Pol Cimento Geopolimérico (2016).

Figura 8 - Aplicações dos geopolímeros na construção civil.



Fonte: Davidovits (2002).

Nos últimos anos 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).

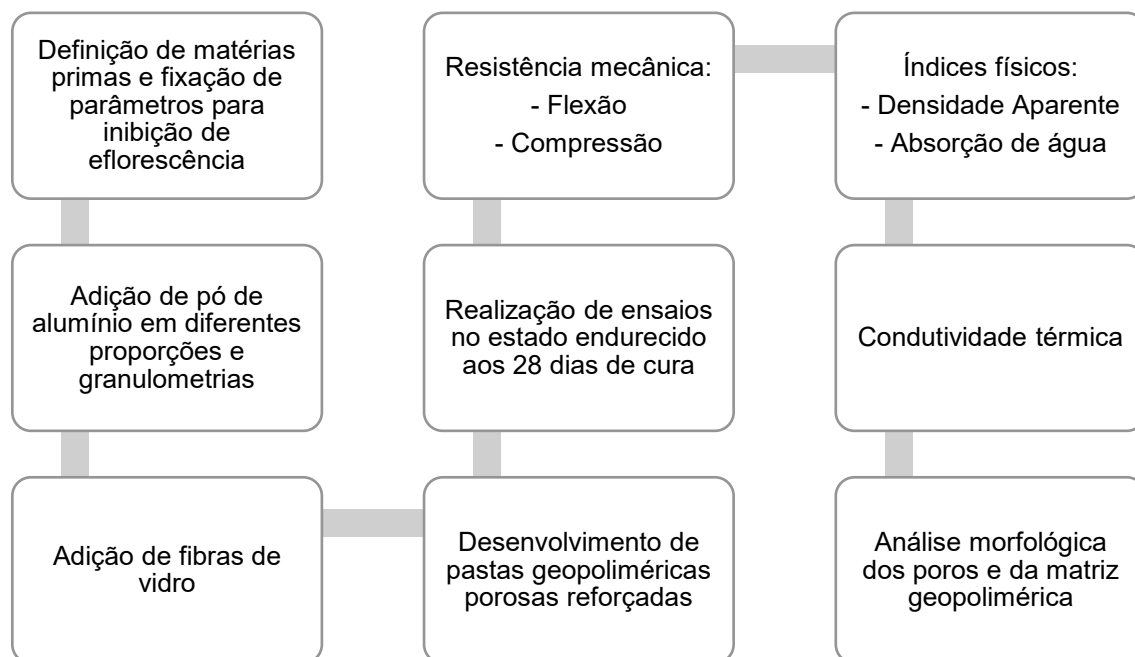
3. METODOLOGIA

No presente capítulo serão apontados os materiais, métodos e equipamentos utilizados para a produção de pastas geopoliméricas a fim de analisar a influência da adição do pó de alumínio em suas diferentes granulometrias e proporções, juntamente com o efeito das fibras de vidro como reforço nas amostras. Para tal, 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 pastas no estado fresco e endurecido.

Desta forma, para a obtenção das amostras citadas, a molaridade da solução, a relação silicato/solução e a quantidade de metacaulim foram mantidas constantes enquanto as quantidades de pó de alumínio (em duas granulometrias distintas) e de fibra de vidro foram variadas.

Após a definição das formulações, uma série de ensaios foram realizados para a caracterização das amostras no estado endurecido das pastas geopoliméricas. A Figura 9 esquematiza todos os procedimentos e ensaios definidos para análise.

Figura 9 – Procedimentos e ensaios para caracterização das pastas geopoliméricas



Fonte: Autor, 2021.

Todos os ensaios laboratoriais necessários para a produção dos corpos de prova foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção e Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável (LabIConS), ambos localizados na UFSC Joinville. Para a caracterização das pastas, alguns ensaios foram conduzidos com o auxílio do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina (CMU/CCT/UDESC) – Unidade São Bento do Sul, enquanto a análise do comportamento térmico e imagens da estrutura porosa no Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica (DEMaC) da Universidade de Aveiro, em Portugal.

3.1. MATERIAIS

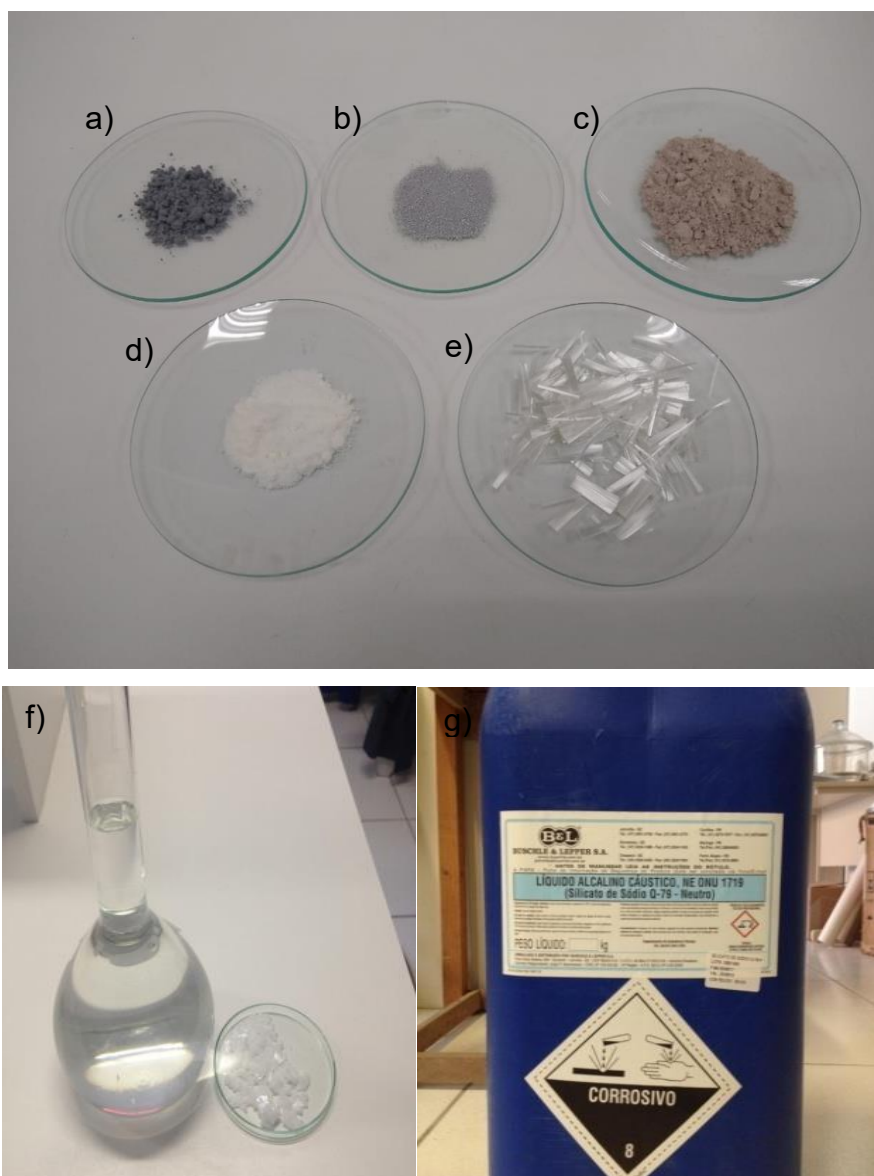
Em sua concepção tradicional, a pasta geopolimérica baseia-se em um material desenvolvido pela mistura de matérias primas de aluminossilicatos e uma solução alcalina ativadora. Para o presente estudo buscaram-se novas alternativas para a substituição da pasta de cimento Portland tradicional por um aglomerante com características semelhantes no aspecto estrutural, porém, obtido de forma mais

sustentável, os geopolímeros. Devido a esta substituição, a pasta proposta para o estudo conteve as seguintes matérias primas:

- Metacaulim como aglomerante, desempenhando as características do cimento Portland;
- Solução de $H_2O + NaOH (10 M) + Na_2SiO_3$, como agente ativador alcalino;
- Pó de alumínio e surfactante como agentes formadores de poros;
- Fibras de vidro comerciais para reforço estrutural.

A Figura 10 apresenta todos os materiais usados para a produção dos corpos de provas das argamassas.

Figura 10 - Materiais utilizados na produção de geopolímeros porosos reforçados com fibras: a) Pó de alumínio (fino); b) Pó de alumínio (grosso); c) Metacaulim, d) Surfactante, e) Fibras de vidro; f) Solução NaOH (10 M); g) Silicato de sódio.



Fonte: Autor, 2020.

Para a produção dos corpos de prova empregaram-se quantidades constantes de metacaulim para todas as 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. A composição química do metacaulim foi determinada por CERMAT (2015) através do ensaio de fluorescência de raios-X e o resultado encontra-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do metacaulim

METACAULIM										
Óxidos	Al₂O₃	CaO	Fe₂O₃	K₂O	MgO	MnO	Na₂O	P₂O₅	SiO₂	TiO₂
Teor (%)	32,6	0,08	2,26	2,13	0,59	< 0,05	< 0,05	0,06	57	1,51
Perda ao fogo	2,62%									
Área Específica	32700 m ² /kg									

Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT, 2015.

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 4 e 5.

Tabela 4 - 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, 2019.

Tabela 5 - Composição química do silicato de sódio

Composição química			
Óxidos	Na₂O	SiO₂	H₂O
Silicato	9,11%	28,5%	61,18%

Fonte: Buschle & Lepper S/A, 2019.

Com o intuito de produzir a formação de poros nas pastas geopoliméricas, o pó de alumínio foi adicionado nas formulações, juntamente com os demais materiais. O material foi cedido pela empresa Alcoa, situada em Poços de Caldas, Minas Gerais. A nomenclatura original do pó de alumínio do fabricante foi alterada para facilitar o

entendimento e descrição no desenvolvimento do trabalho, e estão descritas conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Nomenclaturas dos pós de alumínio

Identificação do Fabricante	Identificação adotada
Tipo 101	Fino
Tipo 13	Grosso

Fonte: Autor (2020).

Foram analisadas duas classes diferentes de pó de alumínio e as informações técnicas sobre os materiais são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Informações técnicas dos diferentes pós de alumínio

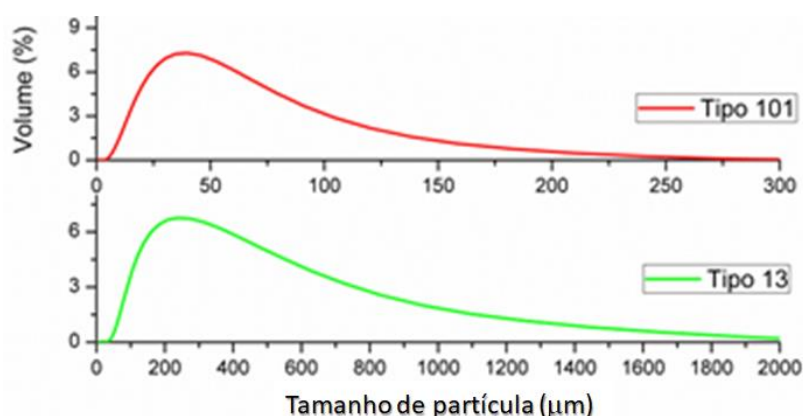
Tipo	Al (%)	Fe (%)	Si (%)	Outros Metais Total (%)
Fino	99,7	0,21	0,05	0,02
Grosso	99,7	0,20	0,06	0,02

Fonte: Alcoa do Brasil (2019).

Análises granulométricas das amostras dos pós de alumínio foram realizadas por Klettenberg (2017) no Laboratório do Curso de Farmácia da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis. O equipamento utilizado para determinar a Distribuição Total das Partículas – DTP, ou seja, a distribuição granulométrica das amostras dos pós de alumínio, foi o *Mastersizer 2000*.

A distribuição granulométrica dos pós de alumínio utilizados nas formulações e seus respectivos códigos de identificação estão apresentados na Figura 11.

Figura 11 - Distribuição granulométrica do pó de alumínio



Fonte: Klettenberg (2018).

Como citado anteriormente, a formação de poros na matriz geopolimérica tende a oferecer uma significativa queda nos valores de resistência mecânica do material. A adição de fibras de vidro neste trabalho ocorrerá com o intuito de proporcionar que estes valores de resistência à flexão e à compressão sejam superiores a amostra de referência. As microfibras foram cedidas pela empresa MM fibras para concreto e suas características estão dispostas na Tabela 8.

Tabela 8 - Características das fibras de vidro

Material	Fibras de vidro AR
Tamanho	15 mm
Cor	Incolor
Resistência a tração	1,698 MPa
Diâmetro	13 a 15 microns
Densidade	2,68 g/cm ³
Módulo de elasticidade	72 GPa
Deformação a ruptura	2 – 3,5%
Resistência a álcali	Alta
Aplicação	600 g a 1,2 kg/m ³ de concreto.

Fonte: MM Fibras para Concreto (2019).

Neste trabalho, pastas geopoliméricas reforçados com fibra foram produzidas usando fibras de vidro industriais provenientes da empresa MM Fibras para Concreto,

mostradas na Figura 12. Avaliou-se a influência da quantidade de fibras de vidro na microestrutura dos geopolímeros, densidade aparente, resistência à compressão e à tração. Esta investigação visa fornecer um conhecimento maior da influência da fibra de vidro juntamente com o efeito do pó de alumínio nas propriedades dos geopolímeros, reduzindo assim a lacuna de conhecimento existente.

Figura 12 - Fibra de vidro comercial - MM fibras para concreto



Fonte: Autor: 2020.

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 pastas para a obtenção de um maior entendimento das adições do pó de alumínio e das fibras de vidro de forma individual e conjunta.

3.2.1. Definição e produção das amostras

Por meio de um planejamento experimental previamente definido foram desenvolvidas dezenove (19) formulações para avaliar os efeitos de duas granulometrias de pó de alumínio, como agente formador de poros, e da adição das fibras de vidro como reforço estrutural. Com base nessas composições, espera-se que

seja possível desenvolver uma relação entre o efeito combinado das adições na matriz geopolimérica porosa.

Utilizando os dados de composição química das matérias primas e testes laboratoriais preliminares, uma formulação de referência foi proposta (Tabela 9), obedecendo às relações das propriedades físicas e químicas citadas por Davidovits (1994) com o intuito de que as amostras não apresentassem eflorescências após a cura. Partindo deste princípio, as demais formulações foram realizadas, primeiramente adicionando apenas as fibras de vidro (Fb) em 0,50% e 1,00%, seguido pela aplicação somente do pó de alumínio fino (PAf) e grosso (PAg) nas proporções 0,15% e 0,30% e posteriormente a adição combinada dos respectivos materiais. Posteriormente, foram desenvolvidas amostras com 0,35% de pó de alumínio com adição de 0,50% e 1,00% de fibras. Não foi possível desenvolver a amostra com 0,35% de pó de alumínio sem a adição de fibras pela elevada redução da resistência do material, impossibilitando a moldagem em corpos de prova prismáticos. A Tabela 10 apresenta todas as formulações propostas para estudo. Ressalta-se que todas as proporções apresentadas tem como base a quantidade em massa dos materiais.

Tabela 9 - Parâmetros fixados para a pasta de referência

Formulação de referência			
MK	NaOH (10 M)	Silicato	Razão S/L
55%	15%	30%	1,22

Fonte: Autor, 2020.

Tabela 10 - Formulações utilizadas para o desenvolvimento de geopolímeros porosos

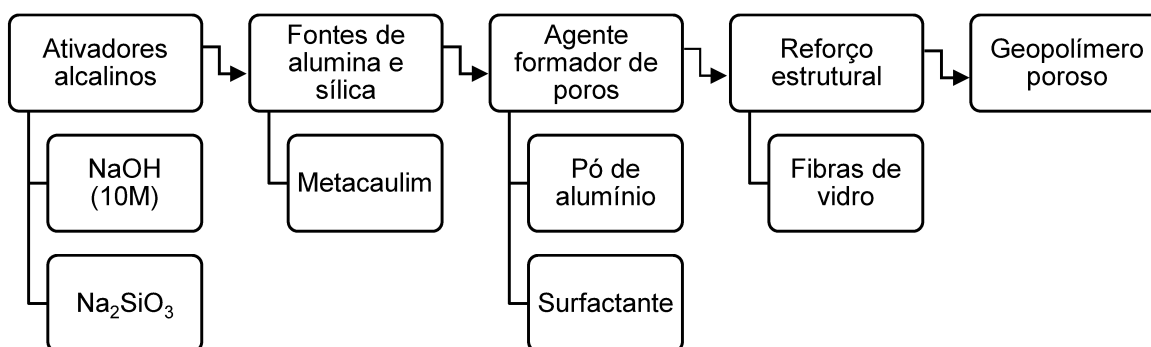
MK	NaOH	Na₂SiO₃	PAf	PAg	Fb	Surfactante
(%)						
55	15	30	-	-	-	-
55	15	30	-	-	0,50	-
55	15	30	-	-	1,00	-
55	15	30	0,15	-	-	0,025
55	15	30	0,15	-	0,50	0,025
55	15	30	0,15	-	1,00	0,025
55	15	30	0,30	-	-	0,025
55	15	30	0,30	-	0,50	0,025
55	15	30	0,30	-	1,00	0,025
55	15	30	-	0,15	-	0,025
55	15	30	-	0,15	0,50	0,025
55	15	30	-	0,15	1,00	0,025
55	15	30	-	0,30	-	0,025
55	15	30	-	0,30	0,50	0,025
55	15	30	-	0,30	1,00	0,025
55	15	30	0,35	-	0,50	0,025
55	15	30	0,35	-	1,00	0,025
55	15	30	-	0,35	0,50	0,025
55	15	30	-	0,35	1,00	0,025

Fonte: Autor, 2021.

O procedimento realizado para a produção dos corpos de provas prismáticos segue a sequência apresentada na figura 13. A solução ativadora NaOH (10 M) + Na₂SiO₃ foi colocada em um recipiente e misturada em um misturador mecânico durante 5 minutos. Logo após a solução foi derramada sobre o metacaulim e misturados no mesmo agitador mecânico durante 2 minutos. Durante 1 minuto a mistura foi realizada 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 8 minutos. Finalizados os 10 minutos de mistura, as diferentes granulometrias e quantidades de pó de alumínio juntamente com o agente surfactante

foram adicionadas por 20 segundos no misturador. Por fim, a adição das fibras de vidro foi feita nos 40 segundos finais da mistura com o intuito de que o processo de formação de bolhas não fosse interrompido. Os equipamentos utilizados para a produção das argamassas estão expostos na Figura 14.

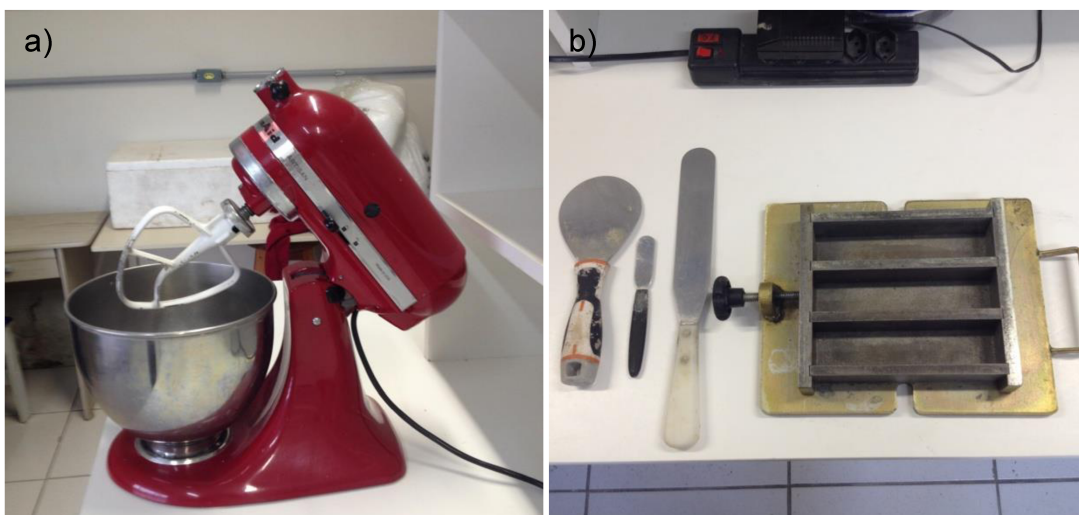
Figura 13 - Fluxograma de elaboração dos corpos de prova



Fonte: Autor, 2020.

Figura 14 - Equipamentos utilizados para a preparação das pastas geopoliméricas:

a) misturador mecânico; b) espátulas e moldes



Fonte: Autor, 2020.

Como um dos principais objetivos do trabalho foi a formação de poros e o reforço estrutural proporcionado pela adição das fibras, é de grande importância ressaltar que logo após a realização das misturas, as pastas não foram adensadas

conforme a norma NBR13279. Para a elaboração 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 o processo de cura/endurecimento. Os corpos de prova ficaram 24 horas em temperatura ambiente de aproximadamente 22 °C e após esse período foram desenformados e posicionados em uma sala com temperatura controlada (Aproximadamente 24 °C) até que alcançassem 28 dias de cura.

As amostras 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. Ensaios no estado endurecido

Após o período de cura dos corpos de prova (28 dias) foram realizados os ensaios para a avaliação das propriedades mecânicas do material (resistência à tração na flexão e à compressão), das propriedades físicas (densidade aparente e absorção de água) e condutividade térmica das amostras geopoliméricas.

3.2.2.1. Caracterização das propriedades físicas

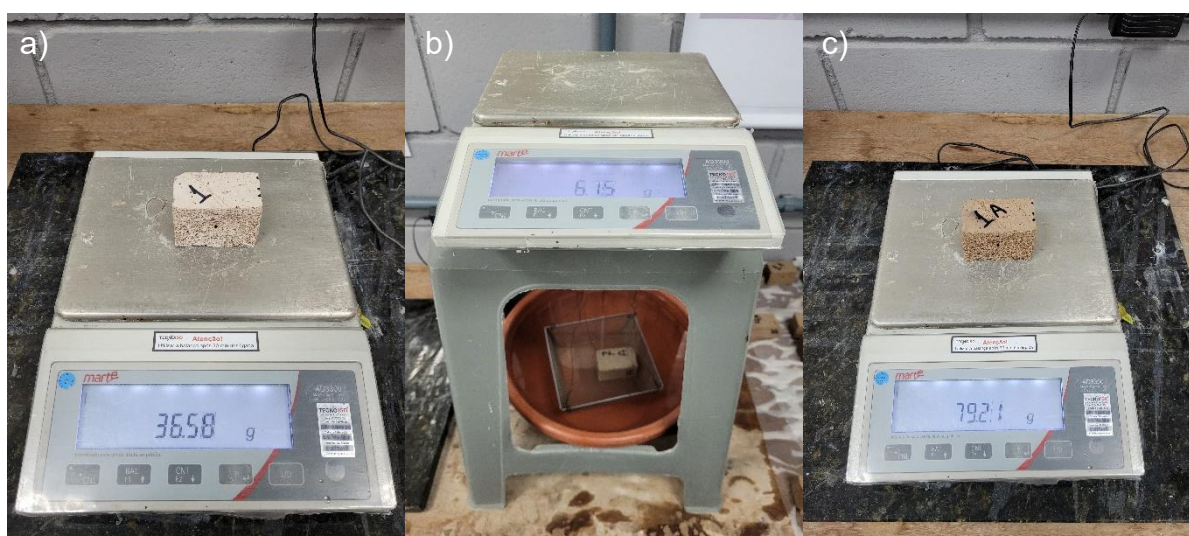
A determinação das propriedades físicas da absorção de água por imersão, porosidade aberta e densidade aparente foram orientadas pela norma NBR 9778 (Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazio e massa específica) (ABNT, 2005). Estes ensaios foram realizados nas matrizes geopoliméricas conforme formulações apresentadas com 28 dias de cura. Os resultados destes ensaios são correlacionados com os resultados de propriedades mecânicas que serão apresentados na seção 4.4.

O método escolhido segue o princípio de Arquimedes (Figura 15) e o mesmo foi adotado por Pennings e Grellner (1989) na caracterização de materiais porosos. A realização destes ensaios consistiu nas seguintes etapas:

- Secagem das amostras em estufa à temperatura de aproximadamente 60 °C (± 1 °C) e pesagem em uma balança de precisão de 0,01 g;

- Imersão dos corpos de prova por 72 horas e pesagem da massa imersa;
- Secagem da superfície das amostras e pesagem da massa do corpo de prova (CP).

Figura 15 - Ensaio de Arquimedes: a) Massa seca; b) Massa imersa; c) Massa saturada com superfície seca



Fonte: Autor, 2021.

Após a obtenção de todas as massas, foram utilizadas as equações 1 e 2 para a determinação da absorção de água e densidade aparente das amostras, respectivamente:

$$\text{Absorção de água} = \frac{m_{ss} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Densidade aparente} = \frac{m_s}{m_{ss} - m_i} \quad (2)$$

Onde:

- m_s = massa seca;
- m_i = massa imersa;
- m_{ss} = massa saturada com superfície seca;

Para a realização da análise morfológica dos poros optou-se pela obtenção de imagens através de uma câmera de alta resolução e microscópio ótico com câmera digital acoplada - Leica EZ4HD (Figura 16). Com isto, pode-se elaborar uma melhor análise do tamanho e formação dos poros. As imagens das pastas geopoliméricas foram obtidas após 28 dias de cura.

Figura 16 - Microscópio ótico com câmera digital acoplada - Leica EZ4HD



Fonte: Autor, 2021.

3.2.2.2. Condutividade Térmica

A condutividade térmica de materiais cimentícios é condicionada pela condutividade térmica dos minerais que a compõe. Essa propriedade regula a quantidade de calor possível de ser transmitida por unidade de tempo através de uma superfície sob determinado diferencial de temperatura. A condutividade térmica expressa a habilidade de um material em conduzir calor, ou seja, materiais com condutividade térmica alta são bons condutores de calor e condutividade baixas caracterizam os materiais designados como isolantes (CLAUSER *et al.*, 1995).

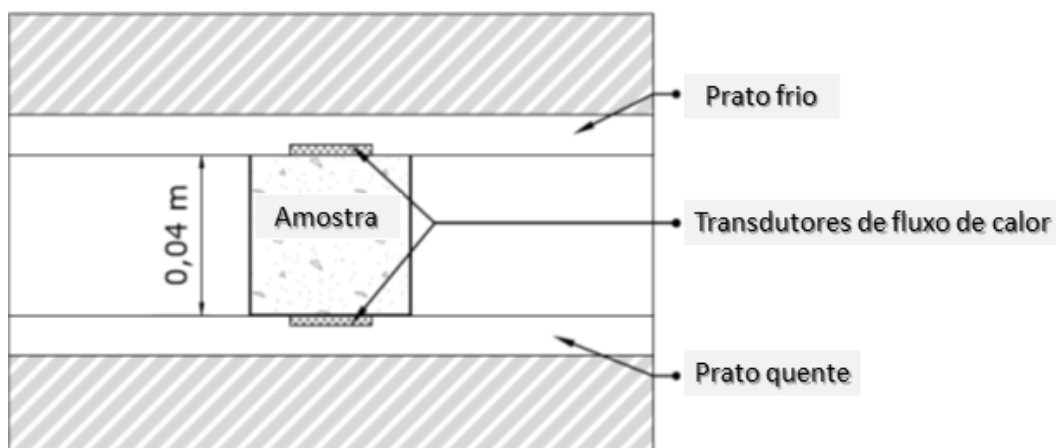
As propriedades termofísicas de uma argamassa ou pasta, segundo Cincotto et al. (1995), são influenciadas por diversos fatores: composição e quantidade de matéria sólida, distribuição, geometria e dimensão dos poros que conferem a estrutura celular da mistura, teor de umidade e tipo de gás contido no interior dos poros.

Akutsu & Sato (1987) afirmam que a condutividade térmica dos materiais está na razão inversa em relação a quantidade de ar presente no material e na razão direta em relação a massa específica aparente. A condutividade aumenta em função do teor de umidade contida nos materiais, uma vez que a água tem capacidade de isolamento inferior ao do ar e substitui parte do volume gasoso contido nos poros. Os valores de condutividade são delimitados pela microestrutura do agregado. Os agregados de estrutura cristalina, agregados quartzosos, com poros interconectados, conduzem mais calor do que os agregados de estrutura vítrea com poros em distribuição discreta.

Segundo Novais (2018), os geopolímeros leves podem ser produzidos pela associação adequada do teor de alumínio e da relação sólido-líquido. Isso permite a produção de geopolímeros com condutividade térmica muito baixa (78,6 mW/mK) exibindo distribuição homogênea de tamanho de poro; que sugere sua utilização em aplicações de isolamento térmico.

O ensaio de condutividade térmica foi baseado na norma C518 (ASTM, 2015) e consistiu em colocar as amostras entre duas placas de troca de calor isotérmica paralelas, mantidas a temperaturas distintas, mas constantes de 313,15 K e 333,15 K, representados na Figura 17 e realizado em Portugal, na Universidade de Aveiro, no Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica (DEMaC). O fluxo de calor unidimensional estabelecido através da amostra de emplastro foi monitorado com medidor de vazão de calor. As medidas de condutividade térmica foram conduzidas em condições ambientes com amostras conforme formulações propostas e com as dimensões de um cubo de matriz geopolimérica (40 mm x 40 mm x 40 mm). As perdas de bordas foram minimizadas utilizando um anel de isolamento em torno da amostra (espuma de poliestireno extrudado, $\lambda \approx 35,0$ (mW/mK).

Figura 17 - Representação de captação de dados de condutividade térmica



Fonte: Senff, 2020.

As medidas de condutividade térmica foram realizadas durante um período mínimo de 5 horas, no qual foi possível verificar a estabilidade do fluxo térmico e garantir a viabilidade dos dados. A condutividade térmica foi calculada utilizando a lei de Fourier de concentração de calor, de acordo com a Equação 3:

Equação 3 - Lei de Fourier para calcular a condutividade térmica.

$$\lambda = \frac{S'E' + S''E''}{2} \frac{L}{\Delta T} \quad (3)$$

Onde λ (W/mK) é a condutividade térmica da amostra, S' e S'' ((W/m²)/V) é o fator de calibração dos transdutores de fluxo de calor, E' e E'' (V) são saídas do transdutor de fluxo de calor, L (m) a distância entre as placas durante o teste, e ΔT (K) a diferença de temperatura na amostra.

3.2.2.3. Resistência à tração na flexão e à compressão

Os experimentos foram realizados em uma máquina universal para ensaios mecânicos, de modelo EMIC GR048, eletromecânica, microprocessada, da marca INSTRON/EMIC, contendo as principais características de: Capacidade máxima: 300

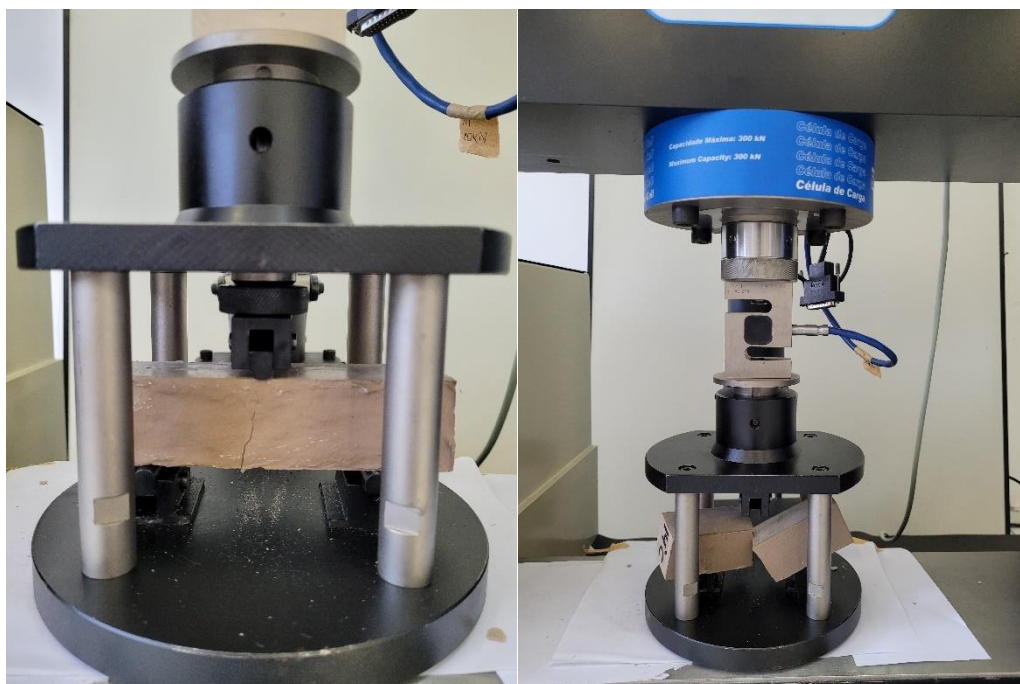
KN (30000 kgf); Tipo: Dupla coluna autoportante e acionamento por meio de fusos de esferas recirculares pré-carregadas com sistema de colunas guias cilíndricas (EMIC, 2016). As Figuras 18, 19 e 20 apresentam os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios no Laboratório de Ensaios Mecânicos do centro CEPLAN/UEDESC, em São Bento do Sul/SC.

Figura 18 - Equipamento para realização de ensaios mecânicos



Fonte: Autor, 2021.

Figura 19 - Ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Autor, 2021.

Figura 20 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autor, 2021.

No presente trabalho foram utilizadas duas células de carga com capacidades de 100 KN (10 tf) para as amostras sem adição de pó de alumínio e 10 KN (1 tf) para as amostras porosas, visando a obtenção de resultados mais precisos, levando em consideração a possível redução na resistência dos materiais porosos.

Os ensaios de resistência de tração na flexão foram realizados conforme indicações da NBR 13279/05 (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos), onde foram moldados corpos de prova prismáticos (40 mm x 40 mm x 160 mm) e aplicada a carga de (50 ± 10) N/s até a ruptura do corpo de prova. A resistência à tração na flexão é calculada segundo a equação:

$$R_f = \frac{1,5F_f L}{40^3} \quad (4)$$

Onde:

R_f é a resistência à tração na flexão, em megapascals;

F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em Newtons;

L é a distância entre os suportes, em milímetros;

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados conforme indicações da NBR 11222/02 (Materiais refratários densos não-conformados – Determinação das resistências à flexão e à compressão à temperatura ambiente), onde foram utilizados os corpos já rompidos à flexão e aplicada uma carga até a ruptura do corpo de prova. A resistência à compressão à temperatura ambiente é calculada segundo a equação:

$$r_{cta} = \frac{P}{A} \quad (5)$$

Onde:

r_{cta} é a resistência à compressão à temperatura ambiente, em megapascals;

P é a carga máxima atingida no momento da ruptura, em Newtons;

A é a área de aplicação da carga, em milímetros quadrados;

Todos os ensaios de rompimento dos corpos de prova foram realizados após 28 dias de cura e as mesmas amostras foram utilizadas para realização dos ensaios de propriedades físicas do material.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

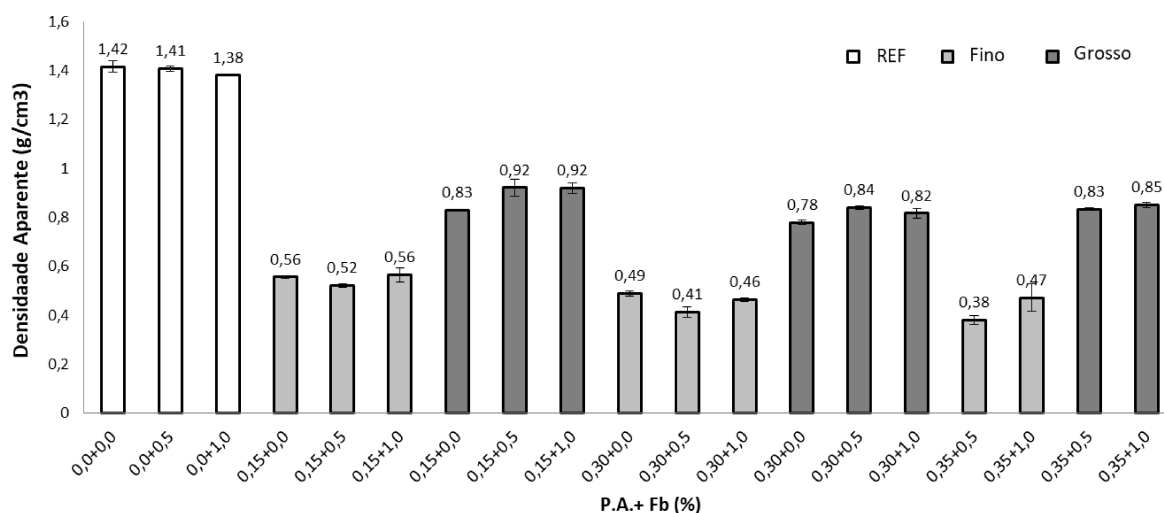
No presente capítulo serão apresentados os resultados obtidos das caracterizações dos corpos de prova geopoliméricos porosos reforçados com fibras de vidro. O capítulo foi dividido em 4 seções: a seção 4.1 trata da caracterização das propriedades físicas da pasta geopolimérica; a seção 4.2 apresenta a análise morfológica dos poros e a interferência das fibras na matriz; a seção 4.3 trata sobre os resultados e discussão a respeito dos ensaios mecânicos (resistência à tração na flexão e à compressão) e a seção 4.4 apresenta os resultados e análises sobre a condutividade térmica das amostras. Ressalta-se que para obtenção de uma análise conjunta de todas as amostras desenvolvidas, a descrição das formulações com adição de pó de alumínio em suas diferentes quantidades (0%, 0,15%, 0,30% e 0,35%) e em granulometrias distintas (fina e grossa) é apresentada da mesma forma e denominada “PA + Fb”, onde PA trata-se do pó de alumínio e Fb as fibras incorporadas. Em todos os resultados apresentados as primeiras quantidades são referentes às amostras com adição de pó de alumínio com granulometria fina (P.A_f) e posteriormente com granulometria grossa (P.A_g).

4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

4.1.1. Densidade aparente

Os valores de densidade aparente foram obtidos e são apresentados na Figura 21. Como esperado, a amostra de referência possui a densidade maior que as demais amostras, decorrente da ausência de poros gerados pelo agente porogênico. Percebe-se ainda que a adição das fibras na mistura não altera significativamente a referida propriedade física da pasta geopolimérica, naturalmente atribuída a baixa quantidade em massa adicionada.

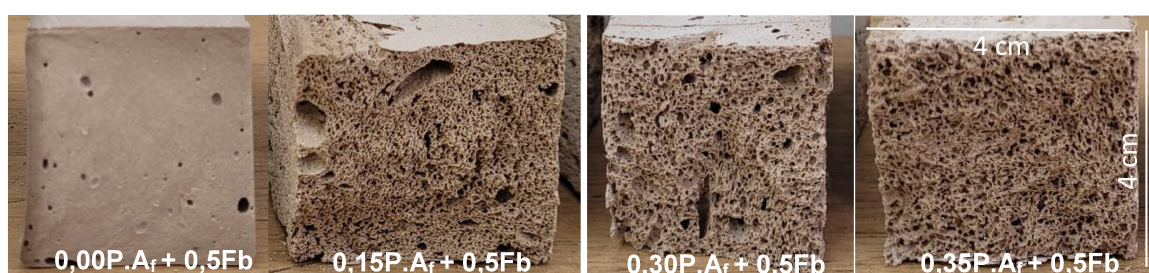
Figura 21 - Densidade aparente das amostras geopoliméricas aos 28 dias de cura



Fonte: Autor, 2021.

Os resultados das densidades aparentes das amostras 0,15P.A_f + 0,5Fb, 0,30P.A_f + 0,5Fb, 0,35P.A_f + 0,5Fb apresentaram uma redução de 63,12%, 70,92% e 73,05% se comparadas a amostra sem adição de pó de alumínio 0,0P.A + 0,5Fb. Além dos resultados citados, destaca-se a formulação 0,35P.A_f + 0,5Fb que apresentou o menor valor dentre todas as formulações (0,38 g/cm³) e, conseqüentemente, uma redução de 73,05% em relação a 0,0P.A_f + 0,5Fb. A Figura 22 apresenta os corpos de prova das quatro formulações comparadas acima.

Figura 22 – Estrutura porosa dos corpos de prova geopoliméricos

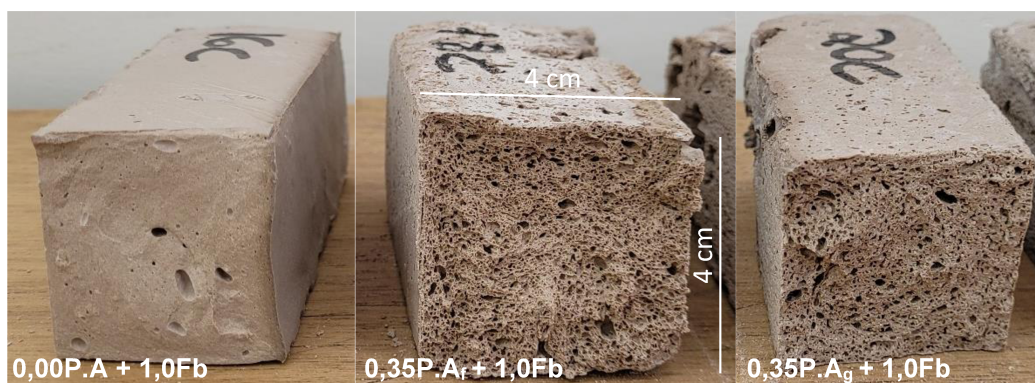


Fonte: Autor, 2021.

A adição do pó de alumínio na granulometria grossa para as mesmas formulações 0,15P.A_g + 1,0 Fb, 0,30P.A_g + 1,0Fb, 0,35P.A_g + 1,0Fb são comparadas com a formulação 0,0P.A + 1,0Fb e a diminuição da densidade aparente é de 34,75%,

40,42% e 41,13%, respectivamente. A Figura 23 demonstra a diferença entre as amostras sem adição de pó de alumínio, com adição de pó de alumínio na granulometria fina e com adição de pó de alumínio na granulometria grossa.

Figura 23 – Características visuais das amostras com diferentes proporções de pó de alumínio aos 28 dias de cura.

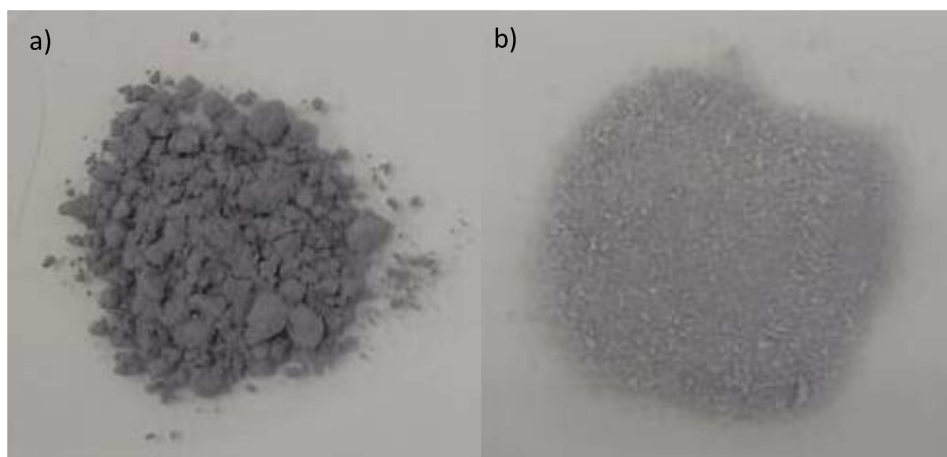


Fonte: Autor, 2021.

Apesar da granulometria grossa apresentar uma redução significativa dos resultados, ficou visível a diferença entre os dois tipos de pós de alumínio, com a nítida vantagem do pó fino em termos de formação de estrutura porosa (será apresentado no item 4.2) e a sua redução da densidade.

Espera-se, baseado em diversos trabalhos de pesquisa já desenvolvidos e publicados sobre geopolímeros porosos, que a adição do pó de alumínio em granulometrias menores apresente uma tendência para geração de bolhas menores e com rápida velocidade de reação, enquanto as partículas maiores proporcionem poros maiores e com menor velocidade de reação. Este fato pode ser atribuído a área superficial sendo expectável que o pó fino apresente valores mais elevados por comparação com o pó grosso (Figura 11 e Figura 24). Sendo, portanto, capaz de ser muito mais ativo logo nos instantes iniciais onde a mistura ainda estava numa condição favorável (fluidez) para se deformar. De fato, foi observado que a formação de poros através do uso do pó grosso demorava mais tempo para o seu início, e, nesse estágio, a mistura já apresentava uma plasticidade reduzida.

Figura 24 - Pós de alumínio adicionados à mistura geopolimérica porosa: a) Pó de alumínio com granulometria fina; b) Pó de alumínio com granulometria grossa

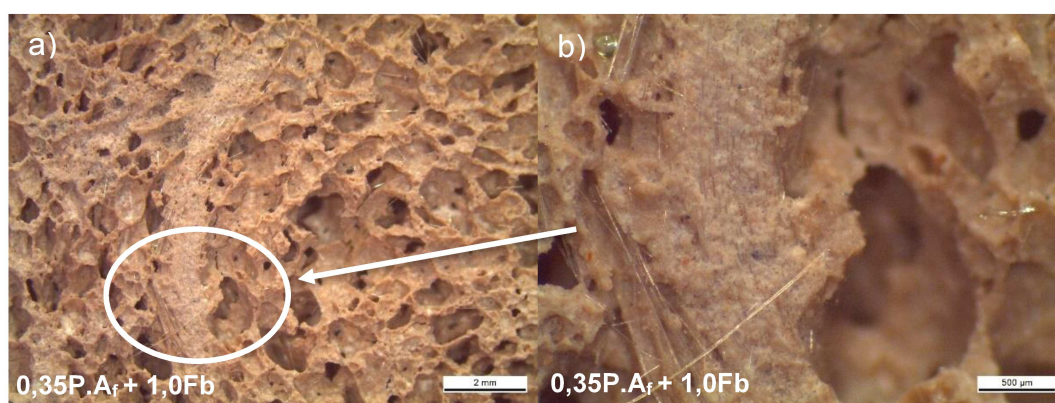


Fonte: Autor, 2021.

4.1.2. Absorção de água

Os resultados de absorção de água nas pastas geopoliméricas (Figura 26) apresentam um comportamento semelhante à medida que as fibras de vidro são adicionadas à mistura. Em termos práticos, isso significa que a sua presença pouco afetou os resultados, embora tenham sempre uma tendência natural de formação de aglomerações, conforme Figura 25.

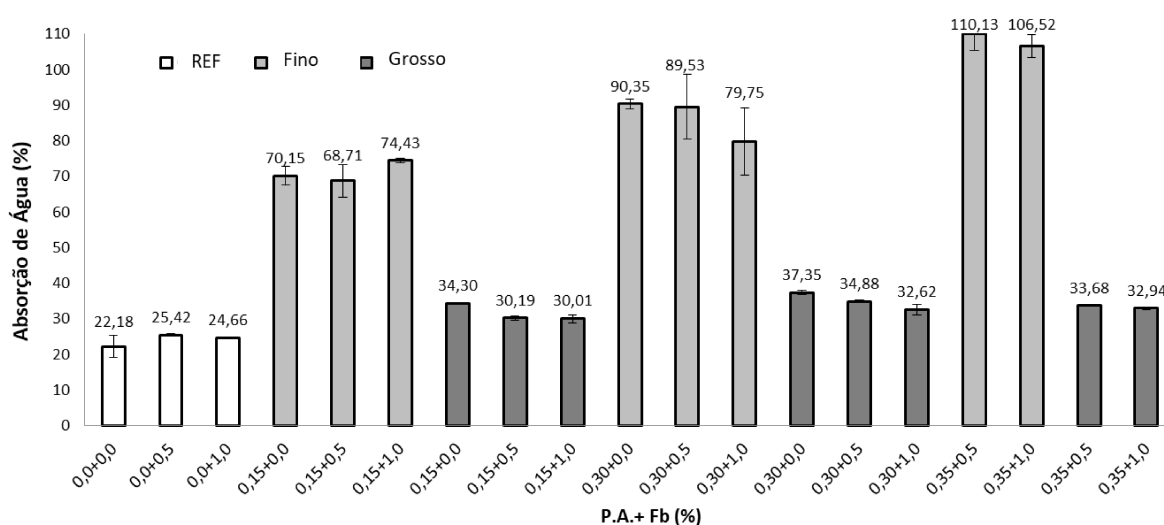
Figura 25 – a) Aglomerações na matriz geopolimérica causadas pela presença das fibras de vidro; b) Ampliação do ponto com aglomerações



Fonte: Autor, 2021.

As formulações com 0,30P.A_f foram as que apresentaram maiores diferenças das médias, mas quando levado em consideração o desvio-padrão, tais diferenças podem ser consideradas como casuais. Entretanto, no momento em que o pó de alumínio fino foi misturado a pasta, a formação de poros na estrutura foi acentuada, o que resultou num aumento significativo da absorção de água para valores superiores a 430%, quando comparadas as amostras 0,0P.A_f + 0,5Fb e 0,35P.A_f + 0,5Fb.

Figura 26 - Absorção de água das amostras geopoliméricas aos 28 dias de cura.



Fonte: Autor, 2021.

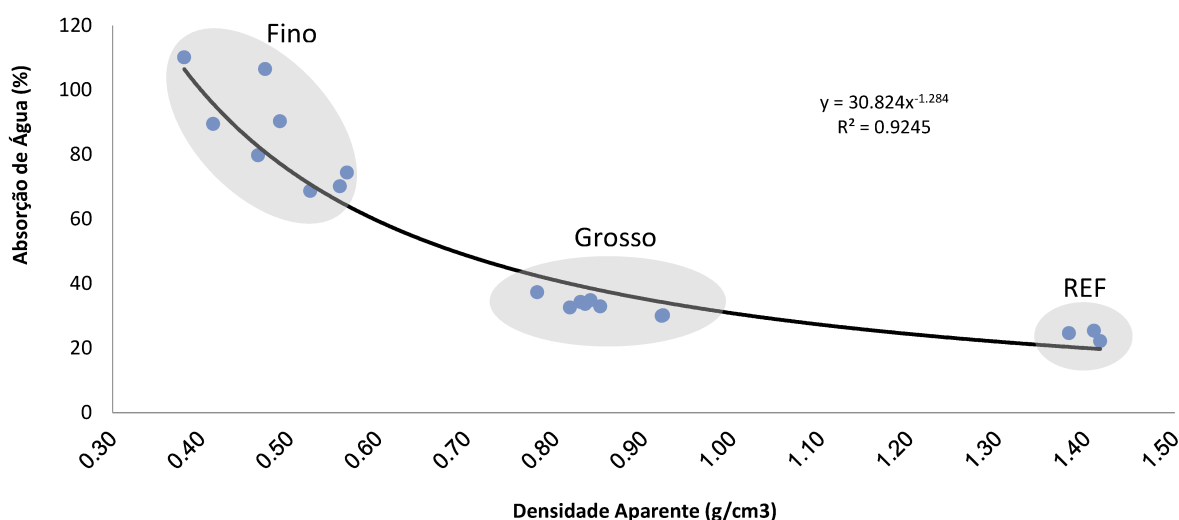
Para as formulações 0,15P.A_f + 1,0Fb, 0,30P.A_f + 1,0Fb, 0,35P.A_f + 1,0Fb os aumentos foram respectivamente 201,82%, 223,40% e 331,95% em relação a 0,0P.A + 1,0Fb. No entanto, quando as mesmas formulações 0,15P.A_g + 1,0Fb, 0,30P.A_g + 1,0Fb, 0,35P.A_g + 1,0Fb com adição do pó de alumínio grosso são comparadas com a formulação 0,0P.A + 1,0Fb, o aumento da absorção de água é de 21,70%, 32,28% e 33,57%.

Pode-se observar que em ambos os casos, a tendência dos maiores valores de absorção de água está relacionada às misturas com maiores valores de adição de pó de alumínio e dependem da granulometria. Esse fenômeno possivelmente ocorre, pois, amostras constituídas com pó de alumínio de menores granulometrias apresentaram poros menores, possivelmente intercalados e em maior quantidade, possibilitando assim a absorção de água.

Importante salientar que, da mesma forma que no caso da densidade aparente, nota-se que a adição das fibras nas amostras de referência, com pó de alumínio fino ou grosso não provocou alterações consideráveis

Os valores de absorção de água e densidade aparente foram correlacionados e são apresentados na Figura 27.

Figura 27 - Relação entre densidade aparente e absorção de água das amostras após 28 dias de cura.



Fonte: Autor, 2021.

Conforme observado na Figura 28, essa relação obedece satisfatoriamente a uma equação exponencial. O valor do ajustamento da curva é de 0,9245, isso indica que 92,45% dos dados das relações entre as propriedades físicas podem ser explicados através da equação proposta, sendo que 7,55% dos dados são afetados por variáveis não controláveis. Percebe-se que a variabilidade da absorção de água tende a diminuir com o aumento da densidade aparente das amostras.

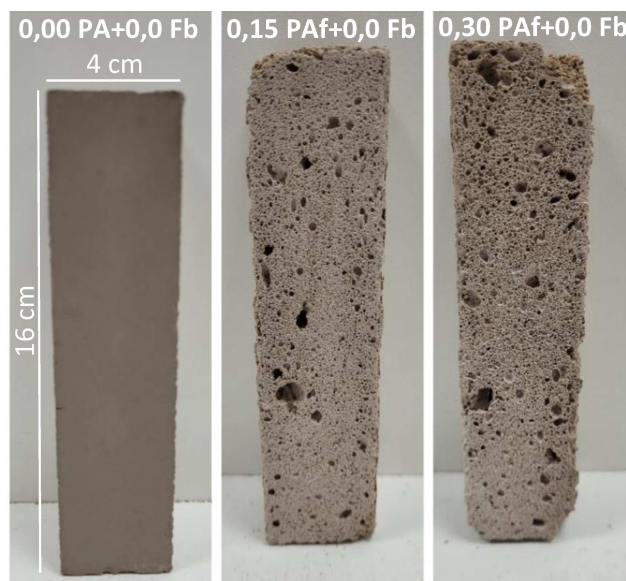
Com base nos resultados encontrados sobre as propriedades físicas do material, pode-se justificar as demais análises dispostas a seguir.

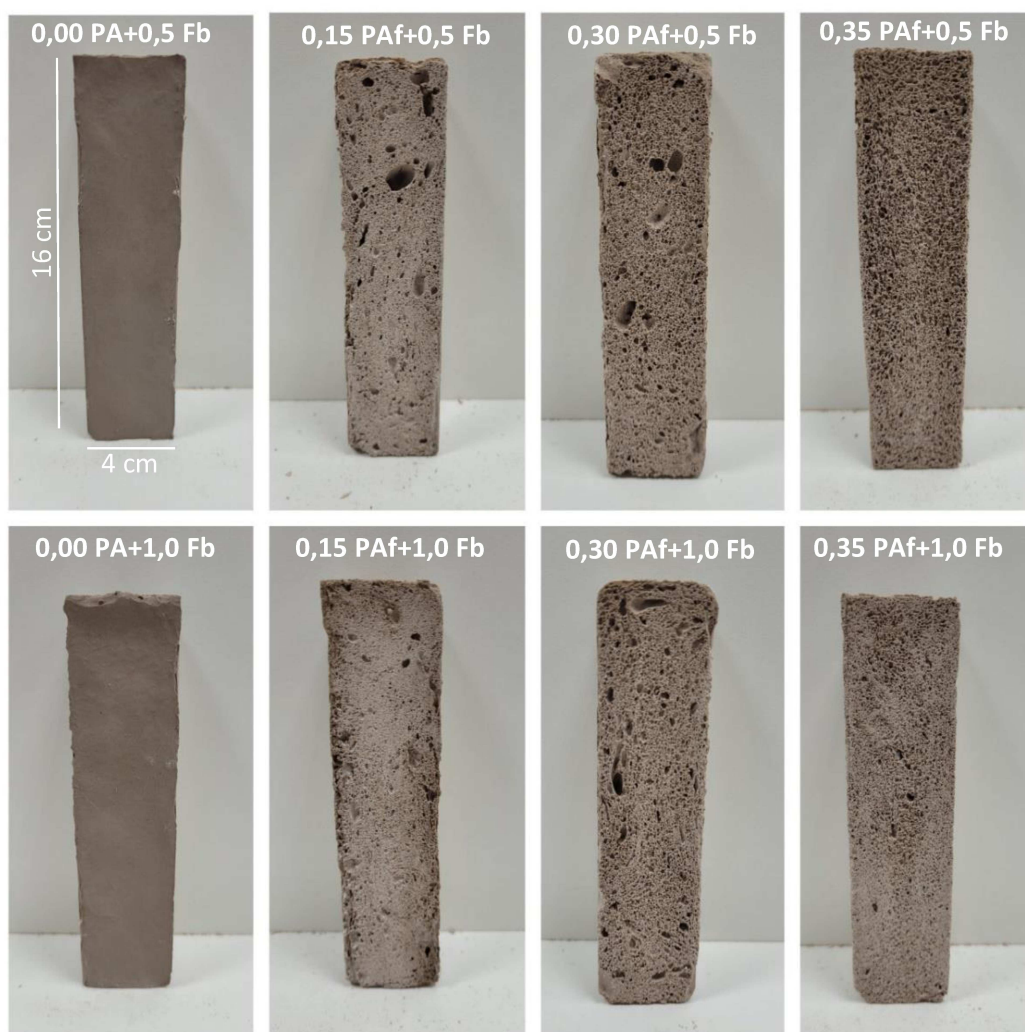
4.2. MORFOLOGIA DOS POROS

Amostras com diferentes teores de pó de alumínio e granulometrias são ilustradas nas Figuras 28 e 29. Ressalta-se que as referidas imagens foram realizadas

com auxílio de uma câmera de alta definição. Nota-se que a porosidade visual dos corpos de prova foi alterada consideravelmente à medida que a quantidade de pó de alumínio foi adicionada à mistura, além da distinção do tamanho e quantidade de poros formados pelas diferentes granulometrias no agente formador.

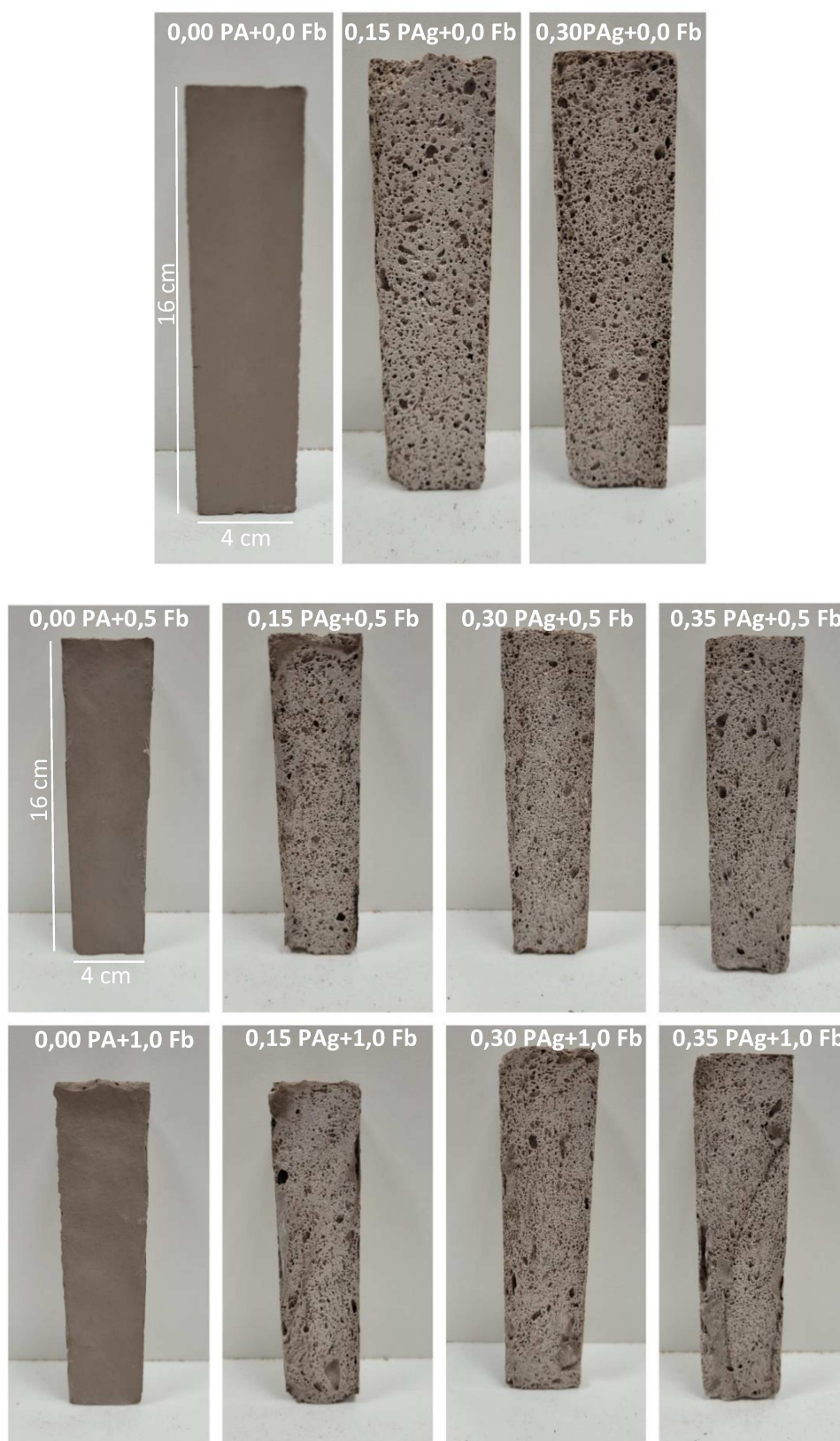
Figura 28 - Amostras primáticas (4 cm x 16 cm) com diferentes teores de pó de alumínio na granulometria fina





Fonte: Autor, 2021.

Figura 29 - Amostras primáticas (4 cm x 16 cm) com diferentes teores de pó de alumínio na granulometria grossa

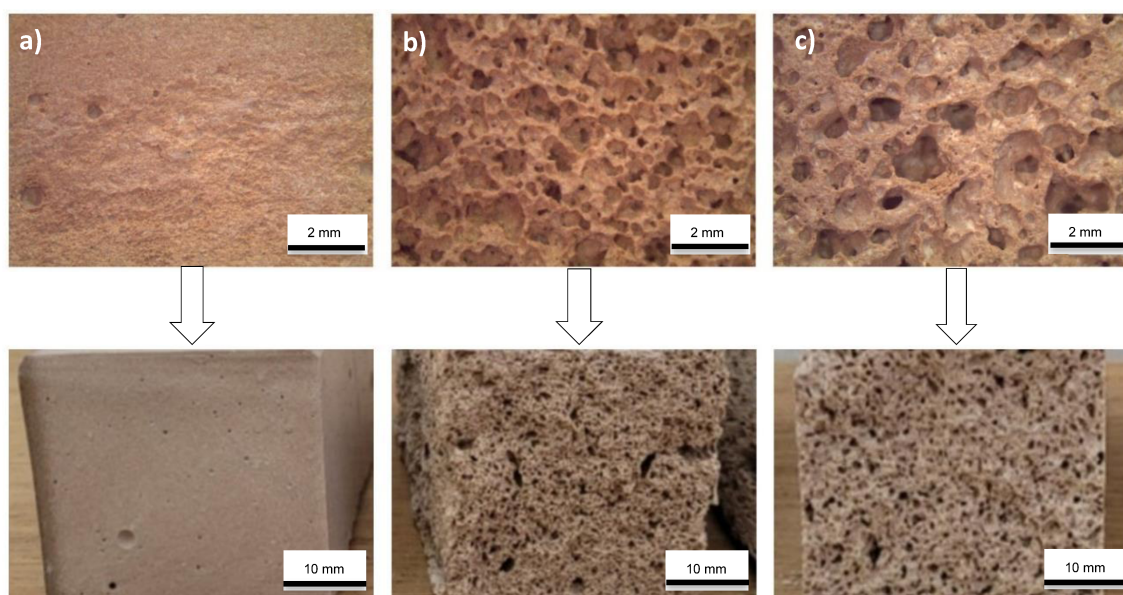


Fonte: Autor, 2021.

A Figura 30 apresenta imagens das amostras confirmando que a quantidade de pó de alumínio influencia no tamanho e distribuição dos poros gerados.

Klettenberg (2018) identificou que diferentes granulometrias do pó de alumínio na matriz geopolimérica implicam em uma reação mais lenta para pó de alumínio com granulometria maior e mais rápida para pó de alumínio com granulometria menor, isso é decorrente da maior área superficial do pó de alumínio fino. Por outro lado, para pó com granulometria mais grossa têm-se poros maiores enquanto para pó com granulometria mais fina têm-se poros menores.

Figura 30 - Análise microscópica das amostras geopoliméricas: a) 0,00 PA + 0,0 Fb; b) 0,30 PA_r + 0,0 Fb; c) 0,30 PA_g + 0,0 Fb



Fonte: Autor, 2021.

Ressalta-se a importância da identificação da capacidade de formação dos poros nas misturas das pastas geopoliméricas, pois, como já descrito no presente trabalho, a quantidade, tamanho e distribuição dos poros afetam diretamente nas propriedades físicas e mecânicas do material. A condutividade térmica também é afetada pela distribuição dos poros como será apresentado no item 4.4.

Outra particularidade se refere à formação dos poros na matriz, pois, 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.

De certa forma, todas as formulações apresentaram boa distribuição de poros ao longo da matriz e a adição de fibras de vidro nas proporções descritas não interferiu significativamente na formação dos poros, o que significa que o processo de adição do pó de alumínio na matriz geopolimérica foi realizado com sucesso.

4.3. ENSAIOS MECÂNICOS

4.3.1. Resistência à tração na flexão

A avaliação da resistência à compressão e à tração é um dos principais requisitos para a produção de argamassas e concretos, com a qual é analisada a capacidade desses materiais de suportar carga (MARTINS, 2011).

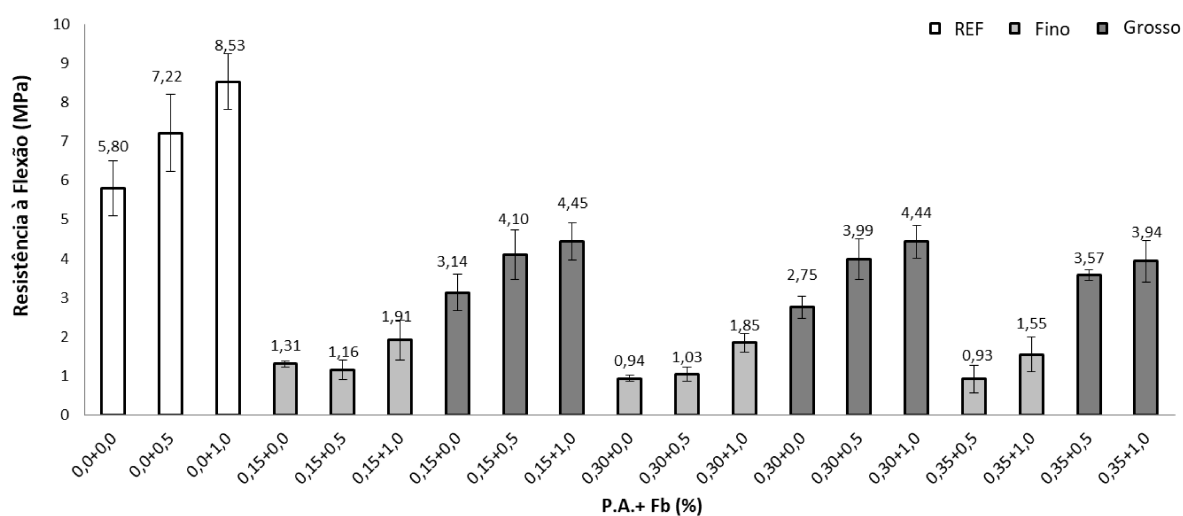
Neste trabalho foram analisados apenas as resistências após 28 dias de moldagem. Essa decisão foi amparada com base em diversos trabalhos como de Zhang *et al.* (2012), Pelisser *et al.* (2013), Novais *et al.* (2016), estes autores demonstraram que o grande incremento de resistência à compressão ocorre substancialmente até os 28 dias.

Para a realização dos ensaios, utilizou-se uma célula de carga no valor de 1T, contribuindo para melhor taxa de aplicação de carga no material. Os valores de resistência à flexão (Figura 31) foram obtidos considerando o valor médio de 4 (quatro) corpos de prova para as amostras com a adição de pó de alumínio fino e grosso (materiais porosos) e 3 (três) amostras por formulação para as amostras somente com metacaulim e fibras (amostras de referência).

Como previsto, a presença do pó de alumínio reduz significativamente os valores de resistência à tração na flexão dos corpos de prova, sendo que a amostra 0,0P.A + 1,0Fb apresentaram valores de 8,53 MPa e as amostras 0,35P.Ar + 0,5Fb um valor médio de 0,93 MPa. Percebe-se, no entanto, que a incorporação de 0,15% de pó de alumínio provoca uma diminuição acentuada na resistência à flexão, e que para teores superiores a diminuição ainda ocorre, mas é menos expressiva. Enquanto os valores de resistência das amostras 0,15P.Ar + 0,0Fb diminuíram 77,4% em relação as amostras 0,00P.A + 0,0Fb, os valores obtidos para os corpos de prova da formulação 0,30P.Ar + 0,0Fb reduziram apenas 28,2% em relação às amostras 0,15P.Ar + 0,0Fb.

A amostra de referência registrou o valor de resistência de 5,80 MPa. As amostras com adição exclusiva das fibras de vidro obtiveram um acréscimo de 19,67% para as amostras 0,0P.A + 0,5Fb e 32% para as amostras 0,0P.A + 1,0Fb. Da mesma forma o efeito das fibras nas amostras porosas, tanto na adição de pó com granulometria fina como de granulometria grossa, gerou um aumento significativo na resistência dos materiais, como apresentado na Figura 31.

Figura 31 - Resistência à tração na flexão das amostras geopoliméricas aos 28 dias de cura



Fonte: Autor, 2021.

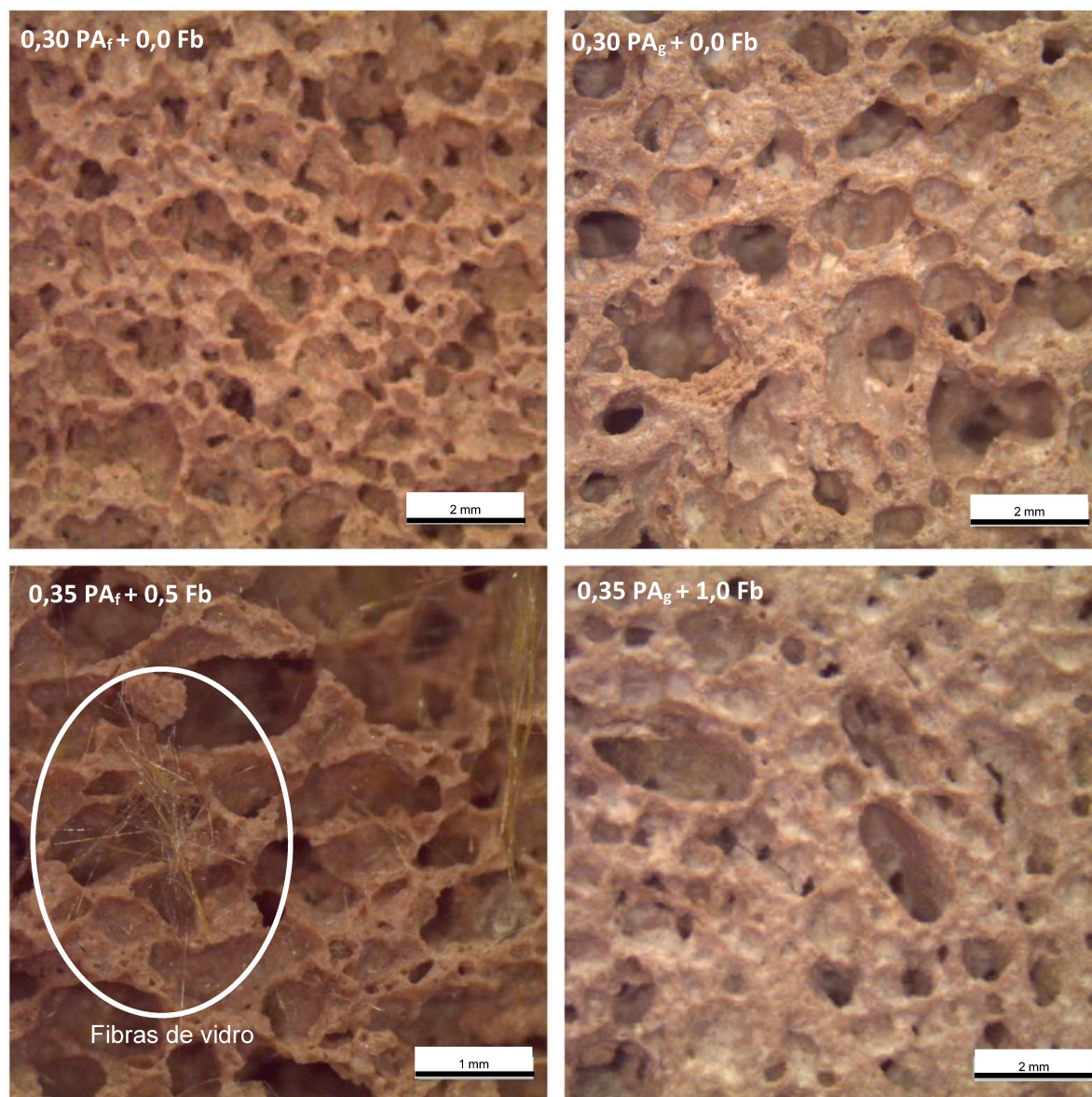
Embora seja comum o desenvolvimento de geopolímeros porosos, a presença das fibras pode aprimorar seu desempenho mecânico. Os valores revelaram que a adição do pó de alumínio proporcionou uma diminuição considerável na resistência mecânica do material, entretanto, a incorporação das fibras de vidro nos materiais porosos proporcionou um aumento de 45,8% e 96,8% quando comparadas as formulações com adição de pó com granulometria fina 0,15P.A_f + 1,0Fb, 0,30P.A_f + 1,0Fb com a amostra sem adição de fibras 0,15P.A_f + 0,0Fb e 0,30P.A_f + 0,0Fb, respectivamente, e aumento de 41,72% e 61,45% quando as mesmas formulações 0,15P.A_g + 1,0Fb e 0,30P.A_g + 1,0Fb com adição do pó de alumínio grosso são comparadas com a formulação sem adição de fibras 0,30P.A_g + 0,0Fb.

Destaca-se o valor de resistência encontrado para as amostras contendo 0,35P.A_f + 0,5Fb que, apesar de revelarem densidades consideravelmente baixas

($0,38 \text{ g/cm}^3$), apresentaram resultados de resistência à tração na flexão próximos às demais formulações com adição de $P.A_f$, porém, com densidades superiores.

Com o aumento das proporções de pó de alumínio têm-se o acréscimo da porosidade, diminuição da densidade e da resistência mecânica (compressão e flexão). Nesse intuito, foram adicionadas fibras de vidro nas misturas e sua distribuição na matriz geopolimérica do material foi analisada microscopicamente conforme a Figura 32.

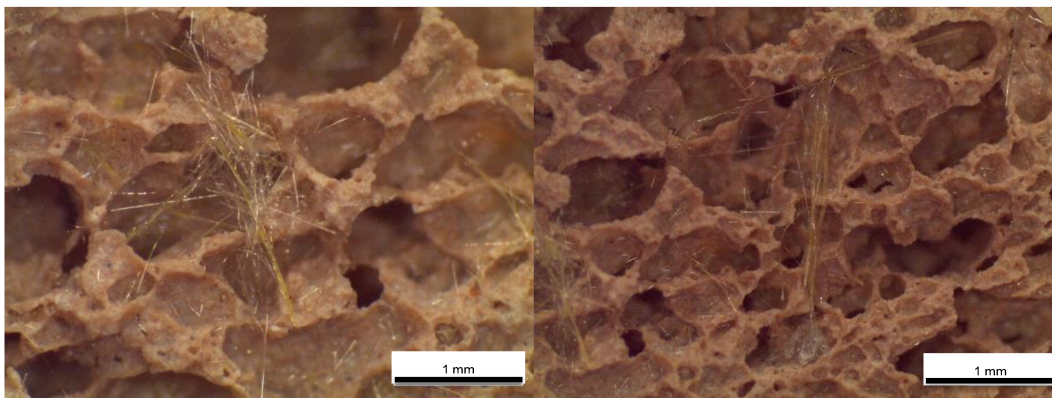
Figura 32 - Análise das fibras de vidro nas amostras geopoliméricas porosas verificadas a partir de imagens do microscópio óptico



Fonte: Autor, 2021.

O fato da presença das fibras afetarem positivamente em termos mecânicos é forte indicativo da sua aleatoriedade direcional na matriz (Figura 3).

Figura 33 - Direção das fibras de vidro na matriz geopolimérica 0,35PAf + 0,5 Fb



Fonte: Autor, 2021.

Percebe-se que a orientação das fibras nas amostras apresenta disposição aleatória, sendo encontradas entre os poros ou incorporadas na mistura em diversas direções. Ainda neste contexto, Novais et al (2017) estudou a utilização de diferentes tamanhos de fibras de vidro na confecção dos geopolímeros porosos, onde concluiu-se que a quantidade de fibras adicionadas a mistura torna-se mais relevante para os resultados físicos e mecânicos do que propriamente o tamanho das fibras. Carvalheiras (2016) desenvolveu estudos sobre a aplicação das fibras de vidro em geopolímeros e identificou que o teor ótimo da quantidade de adição do reforço na mistura é de 1%.

Segundo Neville (2016), a resistência do concreto é, principalmente, uma função do volume de vazios contidos nele. A relação entre a resistência e o volume de vazios não é propriedade exclusiva do concreto, sendo encontrada também em outros materiais como argamassa e pastas. A dependência da resistência da pasta de cimento hidratada em relação à sua porosidade e à distribuição das dimensões dos poros é fundamental.

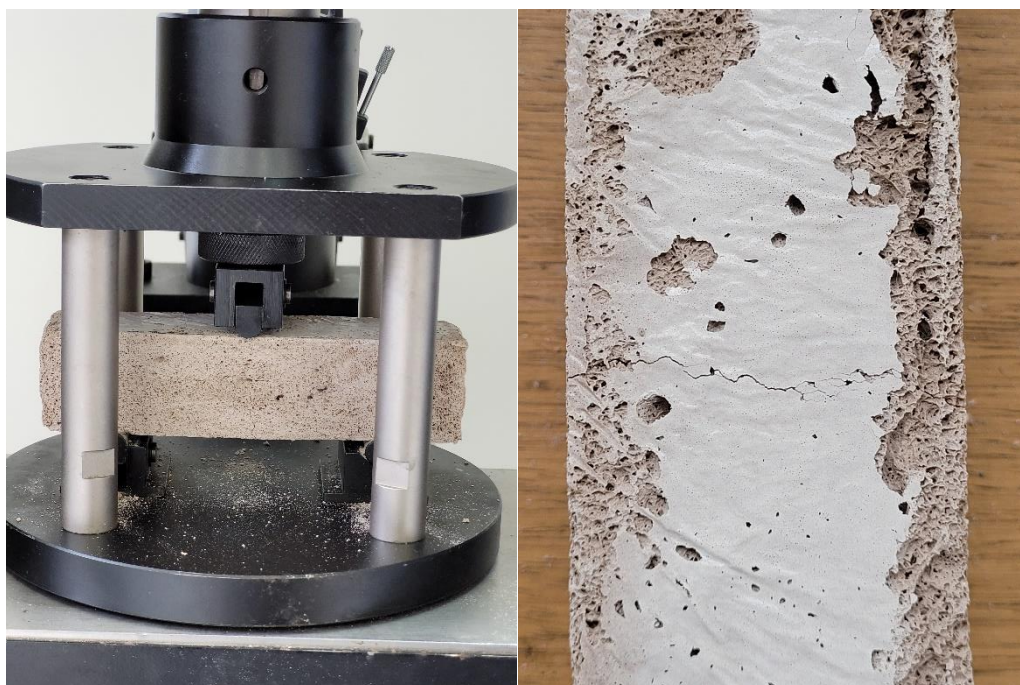
As amostras com a adição de pó de alumínio de maior granulometria tendem a apresentar maior resistência, pois seus poros são maiores e a parede entre eles é mais espessa, enquanto para as demais amostras têm-se maior número de poros, reduzindo a parede entre eles e, por sua vez, fragilizando sua estrutura e reduzindo

sua resistência, tornando a adição das fibras uma alternativa interessante para aplicação deste material.

Klettenberg (2018) estudou o comportamento mecânico dos geopolímeros porosos com adição de pó de alumínio e obteve resultados de resistência à flexão de aproximadamente 1,21 MPa com densidade de 1,06 g/cm³. Senff (2020) também estudou amostras de argamassas geopoliméricas porosas com adição de 2% fibras de vidro e obteve resultados superiores, no valor de 2,3 MPa com densidade de 0,97 g/cm³, comprovando a relevância da implementação de fibras para reforço estrutural. Dessa forma, as amostras desenvolvidas com 0,35P.A_f + 0,5F_b apresentaram excelentes resultados de resistência à tração na flexão se associados com a densidade aparente do material, apresentando valores de resistência similares as amostras desenvolvidas nos trabalhos citados acima, porém, com valores de densidade substancialmente menores.

Através dos ensaios realizados também pode-se analisar o comportamento e a propagação das trincas das pastas geopoliméricas, conforme Figura 34.

Figura 34 - Propagação das trincas após rompimento das amostras



Fonte: Autor, 2021.

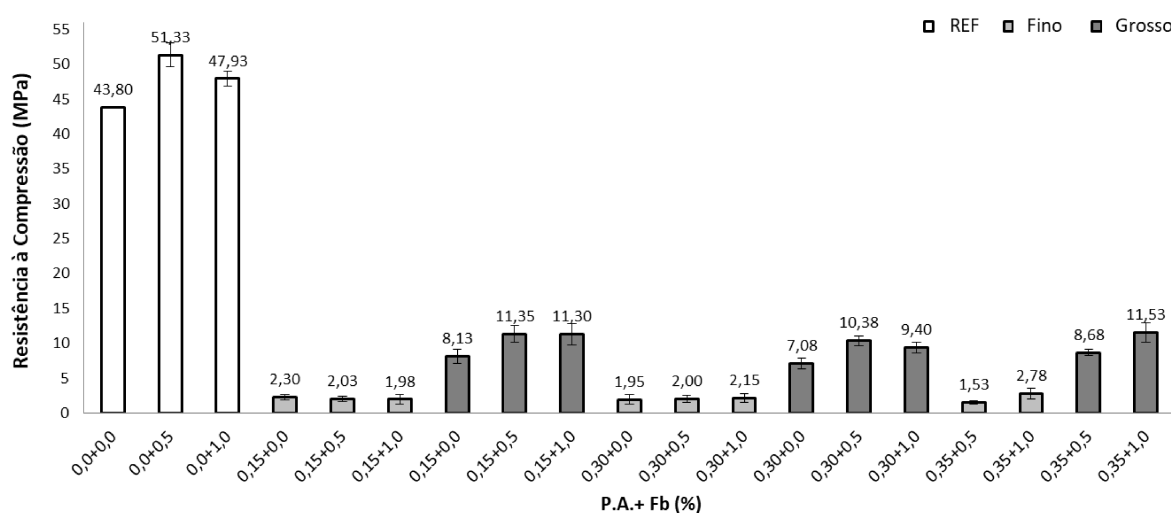
O rompimento dos corpos de prova por tração na flexão não ocorre de forma perpendicular ao eixo. A presença de falhas na geometria e, principalmente a ocorrência de vazios nas matrizes, acentuadas nas amostras porosas, demonstram a heterogeneidade no rompimento dos materiais geopoliméricos.

4.3.2. Resistência à compressão

Após a realização dos ensaios de resistência mecânica 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 pastas, argamassas e concretos desenvolvidos à base de cimento Portland. As amostras de referência e com adição somente de fibras de vidro obtiveram, como esperado, os maiores valores de resistência, alcançando 43,80 MPa, 51,33 MPa e 47,93 MPa para as amostras 0,00P.A + 0,0Fb, 0,00P.A + 0,5Fb e 0,00P.A + 1,0Fb, respectivamente.

Os valores encontrados (Figura 35) apresentam, primeiramente, uma diferença em relação à amostra de referência, manifestando aumento da resistência à compressão de 17,2% e 9,43% em relação as amostras contendo apenas fibras de vidro (0,5% e 1,0% de fibras).

Figura 35 - Resistência à Compressão das amostras geopoliméricas aos 28 dias de cura



Fonte: Autor, 2021.

Da mesma forma que ocorreu nos resultados de resistência à flexão, houve um decréscimo significativo (94,75%) das amostras 0,15P.A_f + 0,0F_b em relação as amostras 0,00P.A + 0,0F_b, tendo em vista que o obtivo principal deste trabalho era o desenvolvimento de materiais leves (baixa densidade). Entretanto, os valores obtidos para os corpos de prova da formulação 0,30P.A_f + 0,0F_b reduziram apenas 15,22% em relação às amostras 0,15P.A_f + 0,0F_b, mostrando que essa variação/redução não é linear, a medida que o agente formador de poros é adicionado a mistura. No mesmo contexto, o efeito gerado pela adição de pó de alumínio em granulometria grossa proporcionou uma queda nos valores de resistência, porém, esses resultados foram superiores quando comparados com as amostras de pó fino e a interação das fibras de vidro na matriz geopolimérica proporcionou um aumento de 39%, 32,77% para as amostras 0,15P.A_g + 1,0F_b e 0,30P.A_g + 1,0F_b em relação à formulação 0,30P.A_g + 0,0F_b.

A resistência de um material é definida pela equação $\bar{\sigma} = F/A$, onde $\bar{\sigma}$ 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, como apresentado nos gráficos acima.

Embora a resistência à compressão tenha reduzido com a adição do pó de alumínio, os resultados encontram-se em um bom patamar. Segundo a norma NBR 13438, que diz respeito a blocos de concreto celular classe 45 autoclavado, descreve que a resistência média exigida para os materiais é 4,5 MPa. Com estes dados chega-se à conclusão de que as amostras com adição de pó de alumínio com granulometria grossa estão com uma resistência superior às exigidas para concreto celular e podem ser aplicadas. Para as amostras com a adição de pó de alumínio fino, a melhor aplicação do material trata-se da utilização como blocos de revestimento, pois atingiram valores superiores a 2,0 MPa com a introdução das fibras.

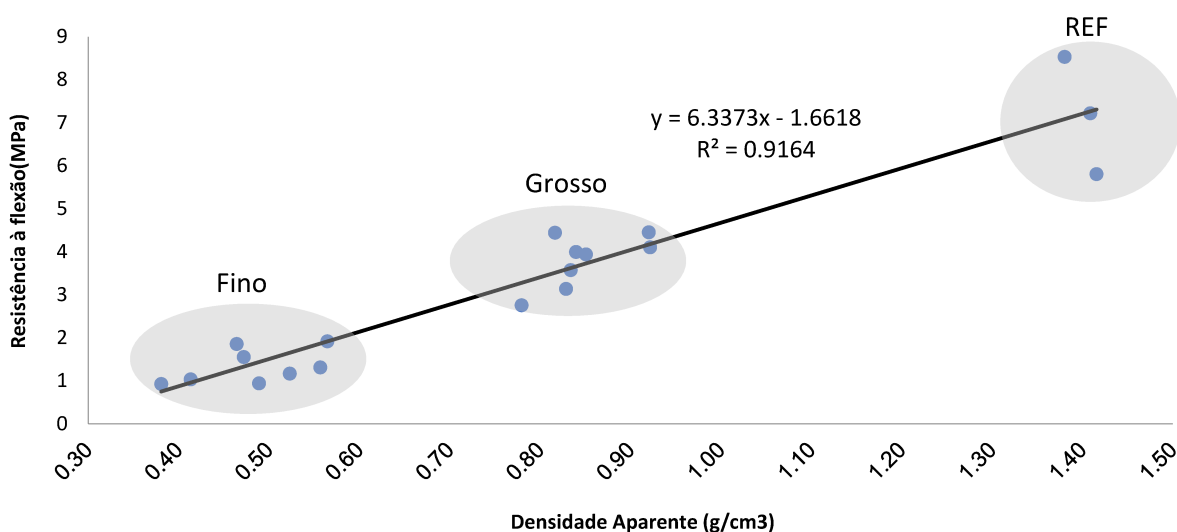
Klettenberg (2018) estudou o comportamento mecânico dos geopolímeros porosos com adição de pó de alumínio e obteve resultados de resistência à compressão das argamassas geopoliméricas porosas com granulometria grossa de aproximadamente 5,08 MPa, enquanto Senff (2020) obteve resultados de

aproximadamente 2,0 MPa para argamassas geopoliméricas porosas com adição de pó de alumínio fino na proporção de 0,3% em relação à mistura. Neste mesmo contexto, porém sem adição de pó alumínio como agente formador de poros, Novais (2017) apresentou resultados de resistência à compressão de pastas geopoliméricas com fibras de vidro para reforço estrutural na ordem de 20 MPa aos 28 dias de cura, resultados estes até 77% maiores para resistência de amostras geopoliméricas com adição de fibras de vidro em relação às amostras sem reforço, com valores de densidade de 1,2 g/cm³.

Ao comparar os resultados da flexão com a compressão, nota-se que a diferença entre a referência e os elementos porosos é menor. É importante ressaltar que a resistência à tração na flexão de argamassas à base de cimento Portland é 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 pastas geopoliméricas contém valores muito maiores que o tradicional.

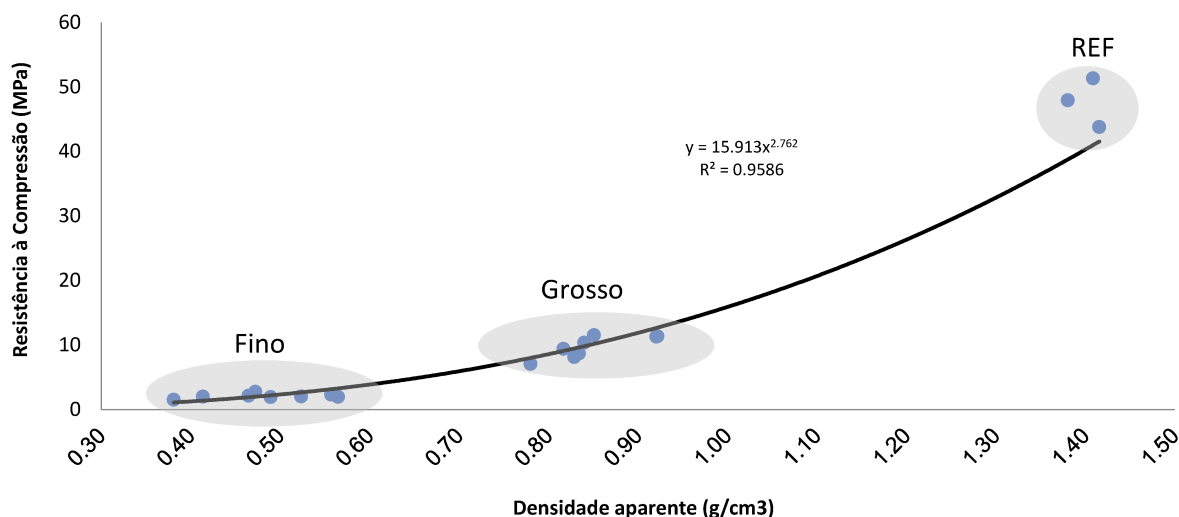
Além da correlação entre a absorção de água e a densidade aparente, optou-se pela realização das relações entre os resultados das propriedades mecânicas (tração na flexão e compressão e a densidade aparente dos corpos de prova, conforme Figuras 36 e 37.

Figura 36 - Relação entre densidade aparente e a resistência à tração na flexão das amostras após 28 dias de cura.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 37 - Relação entre densidade aparente e a resistência à compressão das amostras após 28 dias de cura.



Fonte: Autor, 2021.

Nota-se que os valores de resistência mecânica são inversamente proporcionais à densidade aparente do material, entretanto, os valores de resistência à tração na flexão podem ser aproximados por uma reta e os valores de resistência à compressão por uma função exponencial. Os valores do ajustamento da curva são de 0,9164 para os resultados de resistência à tração na flexão e 0,9586 para os resultados de resistência à compressão, isso indica que 91,64% e 95,86 dos dados das relações entre as propriedades mecânicas podem ser explicados através de uma linha de tendência, sendo que 8,36% e 4,14% dos dados são afetados por variáveis não controláveis, respectivamente. Os resultados apresentados indicam um menor impacto na redução desta propriedade mecânica e comprovam a importância da adição das fibras como reforço estrutural.

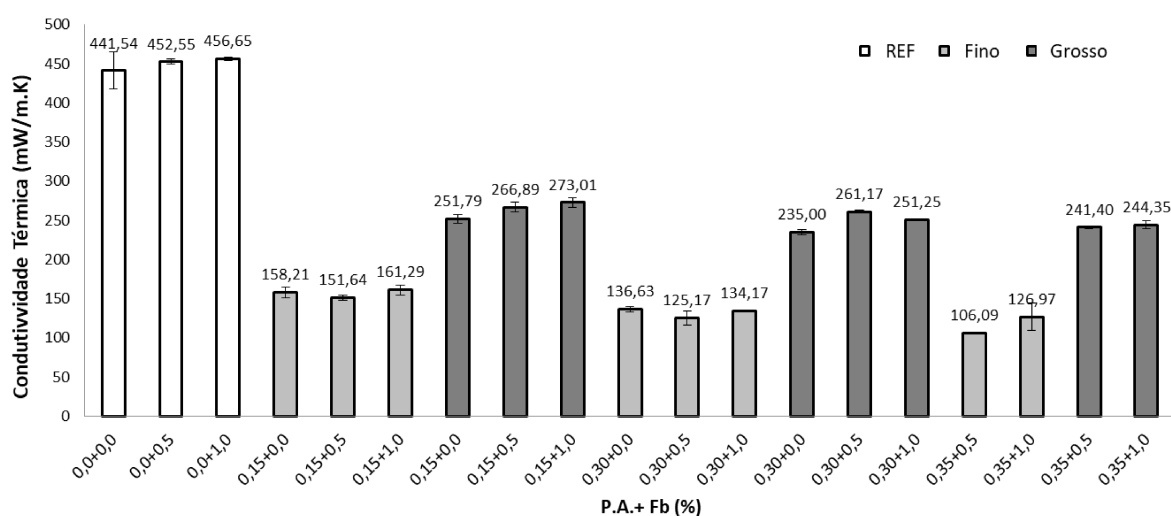
4.4. CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Segundo Bai e Colombo (2018), em diversos materiais, como polímeros, cerâmicas, metais, o comportamento esperado é de a condutividade térmica diminua com o aumento da porosidade.

Porém para Novais *et al.* (2016), outros fatores como a microestrutura, morfologia dos poros, composição química, também influenciam diretamente na condutividade térmica.

Os resultados de condutividade térmica em pastas geopoliméricas contendo pó de alumínio, em diferentes proporções e granulometrias, como agentes formadores de poros e fibras de vidro para reforço mecânico são apresentadas na Figura 38.

Figura 38 - Resultados do ensaio de condutividade térmica das amostras geopoliméricas aos 28 dias de cura



Fonte: Autor, 2021.

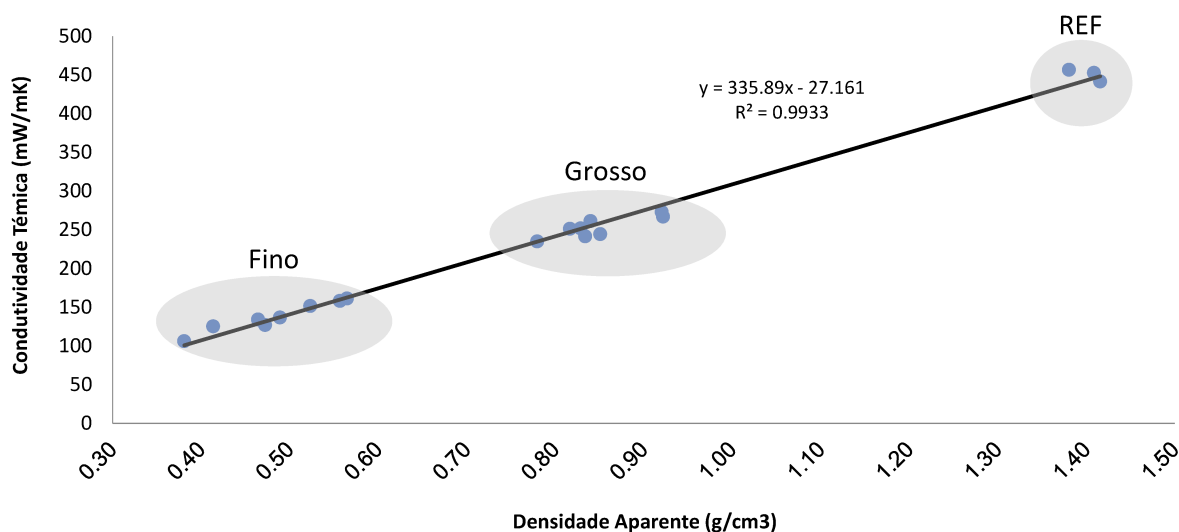
A formulação da amostra 0,35P.A_f + 0,5Fb com 0,35% de pó de alumínio com granulometria fina como formador de poros apresentou o menor valor de condutividade térmica (≈ 106 mW/mK). A distribuição de poros e o tamanho dos mesmos não são favoráveis à transmissão de calor, o que explica apresentar o menor valor de condutividade térmica, cerca de 4 vezes menor do que os valores obtidos para as amostras 0,0P.A + 0,5Fb.

Segundo Vivaldini *et al.* (2014), a porosidade total e o tamanho de poros são variáveis fundamentais, sendo que quanto maior a fração volumétrica de poros menor a condutividade térmica. Poros com tamanho entre 0,5 e 4 μm são os mais eficazes para a redução da condutividade térmica, devido à menor permeabilidade e elevada capacidade de espalhamento conferida à microestrutura.

Novais et al. (2016a) estudaram a produção de geopolímeros leves demonstrando que a influência do agente de formação de poros sobre a cinética de geopolímeros deve ser analisada. Neste contexto verificou-se que a taxa de geopolimerização é apenas ligeiramente afetada pelo agente de expansão, enquanto um forte impacto é exercido pela concentração molar do ativador. A associação adequada entre concentração molar de NaOH e conteúdo de agente de expansão leva à produção de geopolímeros leves, que apresentam uma condutividade térmica muito baixa (até 80 mW/m.K) e densidade aparente (440 kg/m³).

Ainda neste contexto, Novais et al. (2016b) estudaram a utilização de peróxido de hidrogênio na confecção dos geopolímeros porosos. Essa técnica possibilitou a redução de perdas de energia dentro dos edifícios, ao mesmo tempo em que reduziu o volume de resíduos gerados, contribuindo para uma construção sustentável. Novais et al. (2016b) demonstraram que o conteúdo de peróxido de hidrogênio controla as propriedades físicas do geopolímero, como porosidade, densidade, resistência mecânica e condutividade térmica. Este último permite a produção de geopolímeros que exibem propriedades adequadas para aplicações de isolamento térmico. Foram produzidos geopolímeros que exibem condutividade térmica tão baixa quanto 107 mW/mK e uma densidade de 560 kg/m³, mostrando o potencial desses materiais em aplicações que requerem materiais leves e de baixa condutividade térmica. A Figura 39 descreve a associação direta existente entre a condutividade térmica e a densidade aparente das amostras.

Figura 39 - Relação entre a condutividade térmica e a densidade aparente das amostras geopoliméricas aos 28 dias de cura.



Fonte: Autor, 2021.

O impacto do valor de densidade aparente é um fator determinante para o resultado de condutividade térmica. Nota-se que conforme o aumento da quantidade de pó de alumínio na mistura e a redução da granulometria do mesmo, os valores de densidade aparente e condutividade térmica tendem a ser reduzidos. Klettenberg (2018) obteve resultados de condutividade térmica para argamassas geopoliméricas na escala de 238 mW/mK com adição de 0,15% de pó de alumínio em diferentes granulometrias e Senff (2020) apresentou resultados de 216 mW/mK para amostras com adição de 0,20% de pó de alumínio em granulometria fina, comprovando a relevância da utilização de materiais geopoliméricos porosos como isolantes térmicos.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho verificaram-se as propriedades físicas, mecânicas e térmicas de geopolímeros à base de metacaulim com adição de pó de alumínio em diferentes granulometrias como agente formador de poros e fibras de vidro como reforço estrutural. Ao final desta pesquisa foi possível evidenciar visualmente que a quantidade de poros, a distribuição dos poros, o tamanho dos poros, a interligação entre os poros e a disposição das fibras nas misturas são fatores essenciais para o alcance dos objetivos.

Quanto às propriedades físicas, os resultados apontam que a quantidade de poros, a capacidade de absorção de água, assim como a densidade aparente, são indicadores afetados pela quantidade e tamanho da granulometria do pó de alumínio na mistura. As amostras com 0,35P.A_f + 0,5F_b, com 0,35% de pó de alumínio com granulometria fina apresentou o menor valor de densidade aparente (0,38 g/cm³) e maior valor de capacidade de absorção de água (110,13%). Estes fatores influenciam também nos resultados de propriedades mecânicas e condutividade térmica dos geopolímeros.

Os parâmetros de resistência de tração na flexão e à compressão apresentaram comportamentos proporcionalmente semelhantes em relação à queda de resistência para materiais porosos comparados com as amostras de referência. Entretanto, quando as fibras de vidro foram adicionadas à mistura, obteve-se um aumento significativo nos valores de resistência de tração na flexão dos materiais geopoliméricos. As amostras com adição de pó de alumínio, mas sem fibras com 0,150P.A_f + 0,0F_b, 0,30P.A_f + 0,0F_b apresentaram valores de 1,31 MPa e 0,94 MPa, respectivamente, enquanto que os materiais porosos reforçados com fibras resultaram em 1,91 MPa e 1,85 MPa para as amostras 0,15P.A_f + 1,0 F_b e 0,30P.A_f + 1,0 F_b com as mesmas proporções de pó de alumínio. A utilização de fibras de vidro possibilitou a utilização de teores mais elevados de formador de poros, permitindo assim produzir materiais mais leves e com menor condutividade térmica. Quando associados os valores de resistência mecânica com os resultados de densidade aparente do material, notou-se que a formulação 0,35P.A_f + 0,5F_b apresentou os resultados mais relevantes desta pesquisa.

Em relação à condutividade térmica, o menor valor encontrado está alinhado com a amostra 0,35P.Ar + 0,5Fb, com 0,35% de pó de alumínio com granulometria fina, resultando em 106,09 mW/mK. A relação entre a redução da granulometria do pó de alumínio para o aumento da geração de poros na matriz permitiu a obtenção da menor condutividade térmica.

A proposta de uma matriz geopolimérica com a incorporação de pó de alumínio como agente formador de poros é promissora, porém é necessário que se pesquise sobre os fenômenos da interação destas diferentes granulometrias e quantidades sobre o efeito nas propriedades físicas e mecânicas desejadas. Percebeu-se que a adição das fibras de vidro na mistura proporcionou um aumento considerável nos valores resistência à flexão do material e com as quantidades propostas de 0,5% e 1%, a capacidade de geração de poros na matriz geopolimérica não foi alterada.

Com base no conjunto de resultados obtidos no presente trabalho de pesquisa, pode-se afirmar que é possível a utilização do pó de alumínio como agente formador de poros e que a adição de fibras de vidro na mistura contribuiu para o aumento das propriedades mecânicas do material. Aplicações na construção civil poderão ser consideradas relevantes para materiais de revestimento, levando em consideração a capacidade de absorção de água e a redução na condutividade térmica do material desenvolvido.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a elaboração dessa pesquisa, constataram-se alguns aspectos relevantes que podem contribuir com o objetivo de utilizar as pastas geopoliméricas porosas reforçadas com fibras de vidro como materiais multifuncionais na construção civil.

Desta forma para melhorar suas propriedades físicas e térmicas sem a redução das propriedades mecânicas do material, outros fatores podem ser estudados, tais como:

- Estudar a utilização de outros agentes formadores de poros;
- Avaliar a influência do tamanho médio das fibras de vidro na estrutura;

- Substituir as fibras de vidro por fibras de materiais com características semelhantes;
- Utilização de fibras de fontes renováveis e com diferentes diâmetros e comprimentos;

REFERÊNCIAS

_____. **NBR 9778**: Argamassas e concretos endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 11.222**: Materiais refratários densos não-conformados – Determinação das resistências à flexão e à compressão à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 13.279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13438**: Blocos de Concreto Celular Autoclavado – Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

ALCOA. Alcoa do Brasil. Disponível em: <<http://www.alcoa.com.br>>. Acesso em 15 de setembro de 2019.

AKUTSU, M.; SATO, N. M.N.; PEDROSO, N.G. **Desempenho térmico de Edificação Habitacional e Escolares: manual de procedimentos para avaliação**. São Paulo, IPT, 74p, 1987.

AL-MAJIDI, M.H., LAMPROPOULOS, A., CUNDY, A.B., 2017. **Tensile properties of a novel fibre reinforced geopolymer composite with enhanced strain hardening characteristics**. Compos. Struct. 168, 402-427.

ALOMAYRI, T., SHAIKH, F.U.A., LOW, I.M., 2014. **Synthesis and mechanical properties of cotton fabric reinforced geopolymer composites**. Compos. Part B 60, 36-42.

ALZEER, M., MACKENZIE, K.J.D., 2012. **Synthesis and mechanical properties of new fibre-reinforced composites of inorganic polymers with natural wool fibres**. J. Mater. Sci. 47, 6958-6965.

ASSAEDI, H., ALOMAYRI, T., SHAIKH, F.U.A., LOW, I.-M., 2015. **Characterisation of mechanical and thermal properties in flax fabric reinforced geopolymer composites**. J. Adv. Ceram. 4, 272-281.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM **C518** - Standard test method for steady state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus. ASTM International, United States, 2015.

BAI, C.; COLOMBO, P. **Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: A review**. Ceramics International, volume 44, P. 16103-16118, 2018.

B. LIN, H. LIU, **CO₂ emissions of China's commercial and residential buildings**, *Build. Environ.* 92 (2015) 418–431.

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.

Buschle & Lepper S/A. Disponível em: <<https://www.buschle.com.br/>>. Acesso em: 20 de setembro de 2019.

CARVALHEIRAS, J. A. **Estudo da reciclagem de resíduos de fibras de vidro em geopolímeros, argamassas e telas de impermeabilização**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Cerâmica) Universidade de Aveiro, Portugal.

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.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. Boletim técnico nº 68.

CLAUSER, C. E HUENGES, E. **Thermal conductivity of rocks and minerals**. *American Geophysical Union*, Volume 3, P. 105–126, 1995.

D. STANIASZEK, O. RAPF, M. FABER, I. NOLTE, **A guide to developing strategies for building energy renovation**, *Buildings Performance Institute Europe*, 2013. Available from: bpie.eu/documents/BPIE/Developing_Building_Renovation_Strategies.pdf.

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 Concretes, KIEV Ukraine, 1994, p. 2.

DAVIDOVITS, J. **30 years of successes and failures in geopolymer 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.

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

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*.

GEO-POL. Cimento Geopolimérico. Disponível em <<http://www.geopolymer.com.br/>>. Acesso em 08 de outubro de 2016.

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.

GRUPPI CONCRETO. Engenharia do concreto. Disponível em: <<http://www.gruppiconcreto.com.br/index/concreto>>. Acesso em 10 de outubro de 2016.

KLETTENBERG, E. W. **Avaliação da adição de pó de alumínio como agente gerador de poros em uma argamassa geopolimérica**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia e ciências mecânicas) Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville.

KOMMITSAS, K.; ZAHARAKI, D. Geopolymerisation: **A Review and Prospects for the Minerals Industry**. *Minerals Engineering*. p. 20. 2007.

LEVY, M.K. WOO, Y. TAMBOURET, **Energy savings and emissions reductions associated with increased insulation for new homes in the United States**, *Build. Environ.* 96 (2016) 72–79.

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.

MARTINS, L. A. **Desenvolvimento de argamassa autoadensável de alta resistência**. 2011. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Tecnologia em Concreto. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

MM Fibras para concreto. Disponível em: <<https://mmfibras.com.br/tipos-de-fibra/>>. Acesso em 20 de setembro de 2019.

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.

NATALI, A., MANZI, S., BIGNOZZI, M.C., 2011. **Novel fiber-reinforced composite materials based on sustainable geopolymer matrix**. Procedia Eng. 21, 1124-1131.

NEMATOLLAHI, B., SANJAYAN, J., CHAI, J.X.H., LU, T.M., 2014. **Properties of fresh and hardened glass fiber reinforced fly ash based geopolymer concrete**. Key Eng. Mater. 594-595, 629-633.

NEMATOLLAHI, B., SANJAYAN, J., QIU, J., YANG, E.-H., 2017. **High ductile behavior of a polyethylene fiber-reinforced one-part geopolymer composite: a micromechanical-based investigation**. Arch. Civ. Mech. Eng. 17, 555-563.

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.

NEVILLE, A. M., **Propriedades do concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2016. 5ª ed. Capítulo 6, 299-300 p.

NGOULOURE Z.N.M. et al., **Recycled natural wastes in metakaolin based porous geopolymers for insulating applications**, Journal of Building Engineering, 3, 58–69, 1 July 2015. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em 7 jun. 2016.

NOVAIS, R.M, L.H. BURUBERRI, G. ASCENSÃO, M.P. SEABRA, J.A. LABRINCHA, **Porous biomass fly ash-based geopolymers with tailored thermal conductivity**, J. Clean, 2016a.

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, 2016b.

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, 2016c.

NOVAIS, Rui M. et al. **Effective mechanical reinforcement of inorganic polymers using glass fibre waste**. Journal of Cleaner production, v. 116. P 343-349, 2017.

NOVAIS, R. M.; ACSENSÃO, G.; FERREIRA, N.; SEABRA, M.P.; LABRINCHA, J.A. **Ceramics International**, 15 April 2018, Vol.44(6), pp.6242-6249.

OLIVIA, M.; SARKER, P.; NIKRAZ, H. **Water Penetrability of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete**. Conference on Constitution and Building Technol International. p.15. 2014.

PELISSER, F. GUERRINO E. L.; MENGER M.; MICHEL M. D.; LABRINCHA J. A. **Micromechanical characterization of metakaolin-based geopolymers**. Construction and Building Materials, volume 49, p. 547–553, 2013.

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

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

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

P. NEJAT, F. JOMEHZADEH, M.M. TAHERI, M. GOHARI, M.Z.A. MAJID, **A global review of energy consumption, CO2 emission and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO2 emitting countries)**, Renew. Sustain. Energy Rev. 43 (2015) 843–862.

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.

S. BARBHUIYA, **Thermal comfort and energy consumption in a UK educational building**, Build. Environ. 68 (2013) 1–11.

Scopus. Disponível em <https://www.scopus.com/>. Acesso em: 17 de dezembro de 2021.

SEFFF L.; ASCENSÃO, G; HOTZA. D; FERREIRA, V.M; LABRINCHA J.A. **Assessment of the single and combined effect of superabsorbent particles and porogenic agents in nanotitania-containing mortars** Energy Build. Center of Mobility Engineering, Federal University of Santa Catarina; v. 74, 2016.

SEFFF L.; NOVAIS, R.M; CARVALHEIRAS, J ; LABRINCHA J.A. **Eco-friendly approach to enhance the mechanical performance of geopolymer foams: Using glass fibre waste coming from wind blade production**. Construction and Building Materials. Center of Mobility Engineering, Federal University of Santa Catarina; v. 239, 2020.

SILVA, S.P., **Geologia do Caulim**, 2a ed., Belém: DNPM 5° 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.

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.

U.S. Energy Information Administration, International Energy Outlook 2016, 2016.

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.

YAN, L., KASAL, B., HUANG, L., 2016. **A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering**. Compos. Part B 92, 94e132.

ZHANG, Z. WANG H.; PROVIS J.L; BULLEN F.; REID A.; ZHU Y. **Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers**. Part 1. the activation of metakaolin with sodium hydroxide. Thermochimica Acta, volume 539, P. 23-33, 2012.