

Ewerson Valmor Klettenberg

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE PÓ DE ALUMÍNIO COMO
AGENTE GERADOR DE POROS EM UMA ARGAMASSA
GEOPOLIMÉRICA**

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
Coorientadora: Profa. Dra. Derce de Oliveira Souza Recouvreux

Joinville
2018

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

Klettenberg, Ewerson Valmor

Avaliação da Adição de Pó de Alumínio como Agente Gerador de Poros em Uma Argamassa Geopolimérica. / Ewerson Valmor Klettenberg ; orientador, Luciano Senff ; coorientadora, Derce de Oliveira Souza Recouvreux, 2018.

97 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Argamassa Geopolimérica. 3. Agente porogênico. 4. Condutividade térmica. 5. Pó de alumínio. I. Senff, Luciano. II. Recouvreux, Derce de Oliveira Souza. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. IV. Título.

Ewerson Valmor Klettenberg

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE PÓ DE ALUMÍNIO COMO
AGENTE GERADOR DE POROS DE UMA ARGAMASSA
GEOPOLIMÉRICA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Joinville, 08 de março de 2018.

Prof. Breno Salgado Barra, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas

Banca Examinadora:

Prof. Luciano Senff, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina - Orientador (vídeo conferência)

Prof.^a Derce de Oliveira Souza Recouvreux, Dr.^a

Universidade Federal de Santa Catarina - Coorientadora

Prof. Alexandre Mikowski, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Claudimir Antonio Carminatti, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Janaina Lisi Leite Howarth, Dr.^a

Centro Universitário UNISOCIESC

Prof. Adilson Schackow, Dr.

Universidade do Estado de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha amada esposa Cimara, minhas filhas Fernanda e Eduarda, meus queridos pais, colegas de classe e colegas de profissão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para o êxito desta pesquisa, em especial:

À DEUS, que colocou pessoas tão especiais a meu lado, sem as quais certamente não teria concluído essa etapa.

Ao Robson da Silva, técnico de laboratório, que em muitos momentos me auxiliou nos ensaios realizados nos laboratórios na Católica de Santa Catarina.

À empresa ALCOA pela doação dos pós de alumínio atomizado utilizado nesta pesquisa.

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

Aos colegas de profissão pelos incentivos, aos mestres e doutores da UFSC que me orientaram a boa conduta dos trabalhos e pesquisas.

Em especial agradeço a minha esposa e filhas pelo apoio e paciência, pelos momentos que tive que me dedicar aos estudos privando-as de minha companhia.

Aceite com sabedoria o fato de que o caminho está cheio de contradições! Há momentos de alegria e desespero, confiança e falta de fé, mas vale a pena seguir a diante.
(Paulo Coelho)

RESUMO

A otimização do uso de materiais e de energia, assim como a busca pelo conforto e qualidade de vida, são características indispensáveis na concepção de novos projetos. Neste olhar, os cimentos geopoliméricos apresentam-se como importante alternativa ao cimento de alto desempenho, os quais são produzidos a partir de matérias primas de baixo custo, empregando inclusive resíduos agrícolas e industriais. Dentre esses materiais destacam-se os geopolímeros, que quando em contato com uma solução alcalina, reagem e endurecem devido a sua geopolimerização. A matéria prima (material precursor) para a produção de geopolímeros são materiais ricos em sílica e alumina, onde a eficiência da ativação depende da composição química e mineralógica da matéria prima, assim como da proporção das razões molares dos componentes e das condições de cura. As matérias-primas mais utilizadas com esse propósito são as pozolanas naturais e os resíduos industriais. Neste contexto, esta dissertação aborda o desenvolvimento de uma argamassa geopolimérica por meio da ativação do metacaulim como fonte principal de aluminossilicato, o hidróxido de sódio como solução ativadora alcalina, o silicato de sódio como inibidor de efluorescência e o pó de alumínio de diferentes tamanhos atuando como agente gerador de poros. Os resultados mostraram que a adição do pó de alumínio como agente gerador de poros tem influência direta na porosidade, densidade, consistência, resistência mecânica e condutividade térmica da argamassa obtida. A utilização do pó de alumínio proporcionou uma redução da densidade aparente em média 34%. Os resultados dos ensaios das propriedades mecânicas apontam para um resultado de resistência de 88% em média já nas primeiras 24 horas, comparadas aos resultados dos ensaios obtidos após 28 dias de cura. E os resultados de condutividade térmica apontam ganhos significativos com uma variação de aproximadamente 42% entre o maior valor e o menor valor encontrado entre as diferentes formulações estudadas. Logo, a utilização de pó de alumínio para atuar como agente gerador de poros pode ser utilizado em aplicações que demandam materiais mais leves e ambientes que requerem diferentes valores de condutividade térmica.

Palavras-chave: Argamassa geopolimérica. Metacaulim. Porosidade. Pó de alumínio.

ABSTRACT

The optimization of the use of materials and energy, as well as the search for comfort and quality of life, are indispensable characteristics in the design of new projects. In this view, geopolymeric cements are an important alternative to high performance cement, which are produced from low cost raw materials, including agricultural and industrial waste. Among these materials are the geopolymers, which when reacted with an alkaline solution, react and harden due to their geopolymerization. The raw material (precursor material) for the production of geopolymers is silica and alumina rich materials, where the activation efficiency depends on the chemical and mineralogical composition of the raw material, as well as the proportion of the molar ratios of the components and the curing conditions. The most commonly used raw materials for this purpose are natural pozzolana and industrial waste. In this context, this dissertation approaches the development of a geopolymer mortar by means of the activation of metacaolim as the main source of aluminosilicate, sodium hydroxide as alkaline activating solution, sodium silicate as an inhibitor of efflorescence and aluminum powder of different sizes acting as a pore-generating agent. The results showed that the addition of aluminum powder as a pore generating agent has a direct influence on the porosity, density, consistency, mechanical strength and thermal conductivity of the obtained mortar. The use of the aluminum powder resulted in an apparent density reduction of 34%. The results of the mechanical properties tests indicate a resistance result of 88% on average in the first 24 hours, compared to the results of the tests obtained after 28 days of cure. And the results of thermal conductivity show significant gains with a variation of approximately 42% between the highest value and the lowest value found among the different formulations studied. Therefore, the use of aluminum powder to act as a pore-generating agent can be used in applications that require lighter materials and environments that require different values of thermal conductivity.

Keywords: Geopolymer mortar. Metakaolin. Porosity. Aluminum powder.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Aplicações dos geopolímeros segundo estrutura molecular. .	30
Figura 2: Geopolímero expandido para isolamento térmico.	31
Figura 3: Uso do geopolímero como material de reparação de aeroportos.....	31
Figura 4: 4a) espuma geopolimérica; 4b) tijolo maciço; 4c) blocos vazados; 4d) blocos maciços.	32
Figura 5: Representação esquemática da estrutura da caulinita (a), da lamela (b), visão superior (c) e inferior (d) da lamela.	33
Figura 6: Conversão de caulim em metacaulim.	34
Figura 7: Tipos de Metacaulim: Metacaulim do Brasil (a), Advanced Cement Technologies (b) e Engelhard (c).....	35
Figura 8: Concreto Celular.....	37
Figura 9: Hidróxido de sódio em escamas.	38
Figura 10: Silicato de sódio.....	39
Figura 11: Fluxograma de utilização de matérias primas.	41
Figura 12: Esquema para a caracterização das matérias primas e amostras.....	42
Figura 13: Amostra de uma argamassa geopolimérica com eflorescência.....	43
Figura 14: Equipamento para determinar a distribuição total das partículas.	48
Figura 15: Molde para confecção das amostras.	51
Figura 16: Argamassadeira.....	51
Figura 17: Esquema de captação de dados do ensaio de calorimetria... 53	
Figura 18: Calorímetro KEYSIGHT 34972A em coleta de dados..... 54	
Figura 19: Mesa de consistência.	55
Figura 20: Balança para mensurar o CP imerso em água.	57
Figura 21: Esquema de captação de dados de condutividade térmica... 59	
Figura 22: Máquina de Ensaio Universal.	60
Figura 23: Acessórios: a) Ensaio de resistência à compressão, b) Ensaio de resistência à tração na flexão;.....	61
Figura 24: Distribuição granulométrica do pó de alumínio.....	63
Figura 25: Ensaio granulométrico do agregado.....	64
Figura 26: Curva granulométrica do agregado – ABNT – NBR 7211 ..	65

Figura 27: Ensaio de calorimetria das argamassas geopoliméricas com máximo de adição do agente gerador de poros.	66
Figura 28: Amostra na mesa de consistência.	69
Figura 29: Mensuração do ensaio.	69
Figura 30: Diferença de porosidade entre as amostras.	70
Figura 31: Distribuição e tamanho dos poros nas diferentes amostras.	70
Figura 32: Resultado dos ensaios de absorção de água por imersão.	71
Figura 33: Gráfico de curva de nível do ensaio de absorção de água por imersão.	72
Figura 34: Significância dos fatores e suas interações para a absorção de água por imersão.	73
Figura 35: Gráfico de probabilidade normal sobre a propriedade de absorção de água por imersão.	74
Figura 36: Resultado do índice de porosidade aberta.	74
Figura 37: Gráfico de curva de nível resultante do ensaio de porosidade aberta.	75
Figura 38: Significância dos fatores e suas interações para a porosidade aberta.	76
Figura 39: Gráfico de Probabilidade normal sobre a propriedade da porosidade aberta.	76
Figura 40: Resultado do índice de densidade aparente ou massa específica.	77
Figura 41: Gráfico de curva de nível resultante do ensaio de densidade aparente.	78
Figura 42: Significância dos fatores e suas interações para densidade aparente.	79
Figura 43: Gráfico de Probabilidade Normal sobre a propriedade de densidade aparente.	79
Figura 44: Absorção de água por amostra com 10 minutos de ensaio. .	80
Figura 45: Absorção de água por capilaridade com 90 minutos de ensaio	81
Figura 46: Amostras no processo de absorção de água.	81
Figura 47: Gráfico de curva de nível do ensaio de absorção de água por capilaridade com 90 minutos.	82

Figura 48: Significância dos fatores e suas interações para absorção de água por capilaridade com 90 minutos.....	83
Figura 49: Gráfico de Probabilidade Normal sobre a propriedade de absorção de água por capilaridade com 90 minutos.....	84
Figura 50: Resultado do ensaio de condutividade térmica.....	84
Figura 51: Ensaios de Resistência à compressão com 1 dia e 28 dias...	87
Figura 52: Ensaios de resistência à tração na flexão com 1 dia e 28 dias.	87
Figura 53: Ganho de resistência em 1 dia de cura comparado a 28 dias.	88
Figura 54: Correlação resistência à compressão versus densidade aparente.....	88
Figura 55: Correlação resistência à tração na flexão versus densidade aparente.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Materiais Geopoliméricos - Razão atômica Si/Al.....	29
Tabela 2: Composição química da argila caulinítica.....	34
Tabela 3: Nomenclatura dos Pós de Alumínio.....	43
Tabela 4: Quantidades utilizada de pó de alumínio para a formulação das misturas.....	44
Tabela 5: Propriedades e composição Físico-Químicas do Metacaulim.....	46
Tabela 6: Composição química do Metacaulim.....	46
Tabela 7: Propriedades Físico-Químicas do Hidróxido de sódio.....	47
Tabela 8: Informações técnicas dos pós de Alumínio.....	48
Tabela 9: Características físico-químicas do silicato de sódio.....	49
Tabela 10: Distribuição do conjunto de peneiras.....	50
Tabela 11: Formulações e constituintes das amostras para os ensaios de propriedades mecânicas e propriedades físicas.....	52
Tabela 12: Formulação das amostras primárias.....	55
Tabela 13: Formulação das amostras para o ensaio de calorimetria.....	65
Tabela 14: Resultado de calorimetria por tipo de granulometria do pó de Al.....	66
Tabela 15: Índices de consistência.....	67
Tabela 16: Quantidade de Pós de alumínio por mistura em gramas.....	68
Tabela 17: Constituintes da amostra referência para o ensaio de consistência.....	68
Tabela 18: Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	80
Tabela 19: Valores de significância, coeficiente de determinação e coeficiente de determinação ajustado.....	86
Tabela 20: Resultado dos modelos estatísticos nos ensaios de compressão e tração na flexão com 28 dias.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Ac – Absorção por Capilaridade

Al – Alumínio

Al₂O₃ – Óxido de Alumínio

ASMT – *American Society For Testing And Materials*

C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado

CO₂ – Dióxido de Carbono

CP – Corpo de Prova

DTP – Distribuição Total das Partículas

H₂ – Hidrogênio Gasoso

KOH – Hidróxido de Potássio

Mk – Metacaulim

NaOH – Hidróxido de Sódio

Na₂SiO₃ – Silicato de Sódio neutro

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

p – Significância

REF – Referência

R² – Coeficiente de Determinação

R²adj – Coeficiente de Determinação Ajustado

Si – Silício

SiO₂ – Óxido de Silício

S/L – Razão sólido/líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	OBJETIVOS	26
1.1.1	Objetivo geral	26
1.1.2	Objetivos específicos	27
1.1.3	Estrutura do trabalho	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	GEOPOLÍMEROS	29
2.2	METACAULIM (Mk)	33
2.3	PÓ DE ALUMÍNIO	36
2.4	HIDRÓXIDO DE SÓDIO (NaOH)	37
2.5	SILICATO DE SÓDIO	38
2.6	AGREGADOS	39
3	METODOLOGIA	41
3.1	PLANO AMOSTRAL	41
3.2	MATERIAIS	45
3.2.1	Metacaulim (Mk)	45
3.2.2	Hidróxido de Sódio (NaOH)	47
3.2.3	Pó de Alumínio Atomizado	47
3.2.4	Silicato de Sódio (Na₂SiO₃)	48
3.2.5	Agregado Miúdo – Areia média	49
3.3	MÉTODOS	49
3.3.1	Distribuição granulométrica do agregado	49
3.3.2	Preparação das amostras	50
3.3.3	Caracterização no estado fresco	53
3.3.3.1	Calorimetria	53
3.3.3.2	Índice de consistência	54
3.3.4	Caracterizações no estado endurecido	55
3.3.4.1	Análise morfológica	55
3.3.4.2	Caracterização das propriedades físicas	56

3.3.4.2.1	<i>Absorção de água por imersão, porosidade aberta e densidade aparente</i>	56
3.3.4.2.2	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	58
3.3.4.2.3	<i>Condutividade térmica</i>	58
3.3.4.3	Propriedades mecânicas	59
3.3.4.3.1	<i>Resistência à Compressão e à tração na flexão</i>	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1	CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	63
4.1.1	Granulometria do pó de alumínio atomizado	63
4.1.2	Distribuição granulométrica do agregado	64
4.2	CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO.....	65
4.2.1	Calorimetria	65
4.2.2	Índice de Consistência	67
4.3	CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO	69
4.3.1	Análise morfológica	69
4.3.2	Caracterização de propriedades físicas e térmicas	71
4.3.2.1	Absorção de água por imersão.....	71
4.3.2.2	Absorção de água por porosidade aberta	74
4.3.2.3	Densidade aparente ou massa específica	77
4.3.2.4	Absorção de água por capilaridade	80
4.3.2.5	Condutividade térmica	84
4.4	Caracterização das propriedades mecânicas	86
4.4.1	Resistência à Compressão e Tração na flexão	86
5	CONCLUSÃO	91
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
	REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as questões ambientais relacionadas ao modelo de desenvolvimento econômico tradicional tem levado países e empresas a repensarem a forma de utilização dos recursos naturais, sendo que a produtividade parece não ser mais tão relevante diante de aspectos como a redução da geração e o reaproveitamento de resíduos (IBRACON, 2010).

Durante muito tempo o setor industrial, em geral, desenvolveu suas atividades de produção de bens sem a preocupação com a redução da quantidade de resíduos e os impactos que estes possam gerar ao meio ambiente. Hoje, é cada vez mais comum a reciclagem e o reuso de resíduos oriundos da construção civil e de outras indústrias para produção de componentes a serem utilizados na própria construção civil. Desse modo, a busca por novos materiais em substituição aos existentes é cada vez mais estudada e de fundamental importância (PEREIRA, 2014).

Com o surgimento de políticas nacionais voltadas à conservação do meio ambiente, passa a existir a consciência que a geração de novos produtos através da reciclagem de resíduos é uma alternativa concreta e indispensável, já que o desenvolvimento sustentável requer uma redução do consumo de matérias-primas não renováveis e a busca por processos e produtos que gerem menores valores de impacto ao meio ambiente.

O cimento Portland é o ligante mais comum utilizado para a produção do concreto e argamassas. No entanto, ele apresenta uma enorme desvantagem devido ao alto impacto ambiental gerado pela grande liberação de dióxido de carbono (CO_2) proveniente do processo de produção (COSTA et al., 2013). Além das emissões de gases do efeito estufa, o gasto energético é destacado. Ao expressar em números, o consumo global de energia para a produção de cimento situa-se entre 7 e 10 bilhões de GJ/ano, e as emissões de CO_2 correspondem a aproximadamente 6 - 7% da geração mundial (COSTA et al., 2013).

A geopolimerização é uma técnica que, além do baixo consumo energético, possibilita a formação de matrizes com elevadas propriedades mecânicas, estabilidade química e resistência à temperatura (DAVIDOVITS, 2002). Como a produção de geopolímero não exige a calcinação à alta temperatura, como o cimento Portland, os geopolímeros em muito contribuem para o desenvolvimento sustentável. Além disso, são materiais inorgânicos, de alta resistência inicial, estável à temperatura até 1250°C e não inflamáveis. Isto deu um grande

impulso para o desenvolvimento e inovação da técnica (DAVIDOVITS, 2008).

A literatura apresenta algumas alternativas em substituição ao cimento Portland, como a adição de sílicas amorfas (cinzas de casca de arroz, cinzas vulcânicas, escórias de alto forno, etc.) na matriz cimentícia, que proporciona propriedades mecânicas e térmicas interessantes e significativas. A adição do pó de alumínio em uma proporção adequada pode aumentar a eficiência da condutividade térmica das matrizes cimentícias (NGOULOURE et al., 2015).

Estudos recentes têm proposto o uso de matrizes de polímeros inorgânicos porosos de argilas, resíduos ou outros elementos pozolânicos. A motivação vem dos baixos valores de condutividade térmica destes materiais (1 W/m.K), e da resistência ao fogo quando comparado com espumas de polímeros orgânicos (NGOULOURE et al., 2015).

1.1 OBJETIVOS

Pesquisadores buscam incessantemente por processos e materiais mais sustentáveis e economicamente viáveis. Neste caminho, a concepção de uma argamassa geopolimérica porosa obtida através da adição de pó de alumínio como agente gerador de poros modifica o comportamento físico e mecânico da argamassa sendo então utilizado como material de construção. Assim, o desenvolvimento de argamassa geopolimérica e o estudo de suas propriedades, físicas e mecânicas, bem como as suas propriedades térmicas insere-se neste contexto.

1.1.1 Objetivo geral

Este estudo tem por objetivo avaliar a influência da adição de pó de alumínio atomizado como agente gerador de poros em uma argamassa geopolimérica, visando um produto com desempenho técnico adequado para aplicações na construção civil.

1.1.2 Objetivos específicos

Esta pesquisa tem por objetivos específicos:

- I. Produzir amostras geopoliméricas definidas por Planejamento de Experimentos - DOE, fixando quantidades mínimas e máximas dos constituintes na formulação da matriz geopolimérica porosa.
- II. Caracterizar propriedades físicas (condutividade térmica, absorção de água pelo método de Arquimedes e por capilaridade, porosidade aberta, densidade aparente, calor de hidratação, índice de consistência), e propriedades mecânicas (resistência à compressão e flexão).
- III. Avaliar a relação entre as propriedades físicas e mecânicas das argamassas geopoliméricas aos 28 dias de cura.
- IV. Gerar informações gráficas e metodológicas que possam ser utilizadas na sistemática de formulações das matrizes geopoliméricas.
- V. Analisar a morfologia das amostras primárias, ou seja, com a proporção máxima de cada granulometria do pó e a referência sem adição do pó de alumínio, da matriz geopolimérica, na intenção de observar os diferentes tamanhos e a distribuição dos poros.

1.1.3 Estrutura do trabalho

Este estudo está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução ao estudo realizado. O segundo capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre os constituintes utilizados nesta pesquisa. No terceiro capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa, é descrita a metodologia para a produção e caracterização das amostras de geopolímeros e também a apresentação do método de planejamento de experimentos delineado pela matriz geopolimérica e os seus constituintes. No quarto capítulo serão apresentados os resultados obtidos e a discussão sobre os pontos relevantes do material obtido e dos ensaios realizados, contextualizado com a literatura. O quinto e último capítulo apresenta as conclusões sobre o estudo realizado, finalizando com as sugestões acerca de temas para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar de forma breve uma fundamentação teórica sobre geopolímeros, metacaulim, pó de alumínio, hidróxido de sódio, silicato de sódio e agregados, contribuindo desta forma para o desenvolvimento desta pesquisa.

2.1 GEOPOLÍMEROS

Existe uma divergência quando se define geopolímeros. Vários autores o conceituam como polímeros inorgânicos e seus produtos. Por sua vez, Joseh Davidovits classifica-os como polímeros minerais (DAVIDOVITS, 2008). Os primeiros geopolímeros sintetizados utilizavam como materiais precursores quartzo, caulinita e hidróxido de sódio em concentrações variadas e temperatura de síntese de 150 °C. Desta forma, os geopolímeros apresentam minerais bases aluminossilicatos (caulinita, metacaulinita, cinzas voláteis, solo calcinado) que, em condições alcalinas, promovem as reações que possibilitam as ligações poliméricas Si-O-Al-O.

A tabela 1 demonstra a aplicação dos materiais geopoliméricos em função da razão atômica silício/alumínio (Si/Al).

Tabela 1: Materiais Geopoliméricos - Razão atômica Si/Al.

Razão Si/Al	Aplicação
1	Tijolos, cerâmicas e proteção ao fogo
2	Cimentos e concretos de baixa emissão de CO ₂
3	Compósitos de fibras de vidro resistentes ao fogo
>3	Selantes para a indústria (200°C a 600°C)
20-35	Compostos de fibras resistentes a fogo e aquecimento

Fonte: DAVIDOVITS (1994).

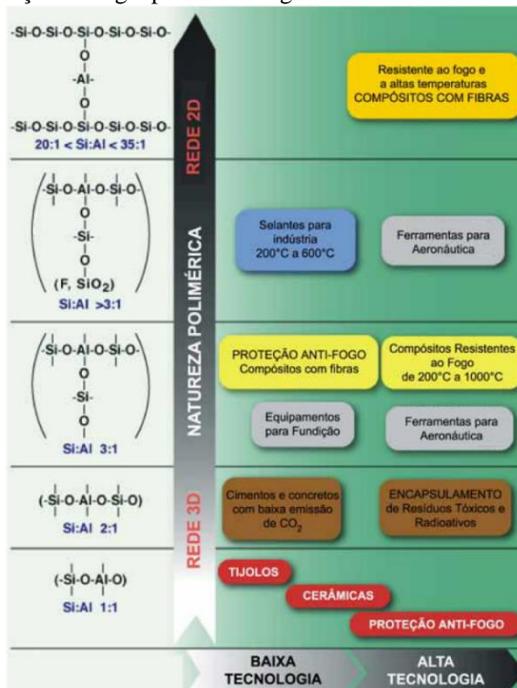
Atualmente, os geopolímeros são conhecidos por uma série de nomes, entre eles: cerâmicas alcalinas, hidrocerâmicas, cimentos ativados alcalinamente, polímeros inorgânicos, entre outros.

Para Pinto (2006), geopolímeros são polímeros inorgânicos cuja obtenção ocorre pela polimerização de matérias-primas naturais de origem geológica contendo aluminossilicatos. A escolha dos materiais para o desenvolvimento do geopolímero depende de fatores como a

disponibilidade, o custo, o tipo de aplicação e a demanda específica do produto final. Os líquidos alcalinos são metais alcalinos solúveis, que geralmente são à base de sódio ou potássio, sendo os mais utilizados o hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH), muitas vezes, combinados com silicato de sódio ou de potássio (WALLAH, 2006).

Como resultado tem-se uma rocha sintética amorfa e estável quimicamente, um cimento com resistência a flexão e a tração superior comparado aos cimentos tradicionais, melhores acabamentos superficiais, eliminando etapas seguintes, e, por se apresentarem com resistência inicial extremamente alta, são usados onde há necessidade de liberação rápida (vias, pista de aeroportos, manutenção industrial, etc.). A Figura 1 apresenta algumas aplicações dos geopolímeros conforme sua estrutura.

Figura 1: Aplicações dos geopolímeros segundo estrutura molecular.



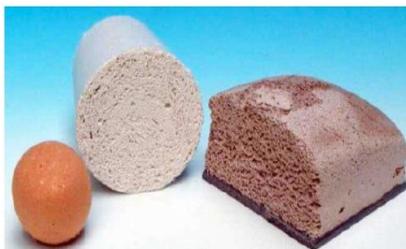
Fonte: Geo-Pol Cimento Geopolimérico (2006).

Dentre as vantagens de substituição do cimento convencional por geopolímeros, podemos citar: matéria prima abundante, economia de

energia e sustentabilidade ambiental, processo de produção simples, estabilidade volumétrica, rápido ganho de resistência, durabilidade, resistência ao fogo, baixa condutividade térmica, quando utilizado na produção de concretos não dão origem a reações álcaliagregado, elevada resistência a ciclos de congelamento-descongelamento, excelente comportamento a ataque de sulfatos, elevada resistência de aderência, uso de uma variedade de agregados sem perda de resistência, facilmente misturado e aplicado (MACCARINI, 2015).

A Figura 2 mostra geopolímeros expandidos para o isolamento térmico para a produção de painéis de isolamento. Segundo Davidovits (2002), o concreto geopolimérico também é utilizado em aplicações de infraestrutura e reparação de rodovias. Um exemplo foi a aplicação do cimento *Pyrament*® nos aeroportos militares temporários da Arábia Saudita durante a guerra do Golfo em 1991, apresentado na Figura 3.

Figura 2: Geopolímero expandido para isolamento térmico.



Fonte: Davidovits (2002).

Figura 3: Uso do geopolímero como material de reparação de aeroportos.

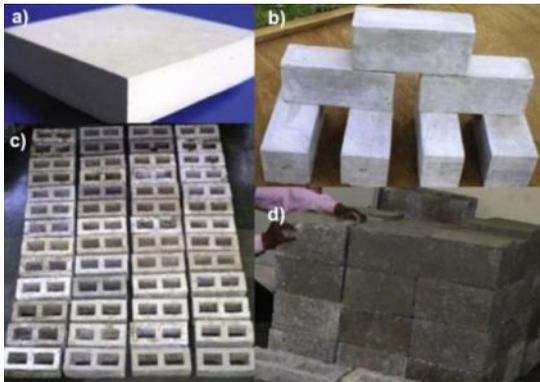


Fonte: Davidovits (2002).

Na Figura 4 têm-se outras aplicações através de diversos tipos

de blocos produzidos com matriz geopolimérica, tais como espuma geopolimérica, tijolo maciço, blocos vazados, blocos maciços.

Figura 4: 4a) espuma geopolimérica; 4b) tijolo maciço; 4c) blocos vazados; 4d) blocos maciços.



Fonte: Singh et al. (2015).

Ainda comparando o geopolímero ao cimento Portland, pode-se observar outra diferença no processo de reação para obtenção da estrutura final. Os cimentos Portland pozolânicos dependem da presença de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) para a formação da matriz e ganho de resistência, enquanto os geopolímeros utilizam a policondensação dos precursores de sílica e alumina e um alto teor de álcali para atingirem resistência estrutural formando aluminossilicato hidratado (KHALE e CHAUDHARY, 2007).

Devido às características físico-químicas, os geopolímeros garantem propriedades de destaque no estado fresco como: boa trabalhabilidade, boa coesão e acabamento superficial, o que resulta em um ganho rápido de resistência mecânica e dureza superficial (PINTO, 2006). Porém, estudos demonstram que as propriedades dos geopolímeros podem ser afetadas por uma pequena alteração na quantidade de Si e Al disponível na reação.

Portanto, a compreensão completa da reatividade das matérias primas ativadas alcalinamente é importante, principalmente para determinação das composições iniciais de síntese do geopolímero para alcançar as propriedades desejadas (SILVA et al., 2007).

2.2 METACAULIM (Mk)

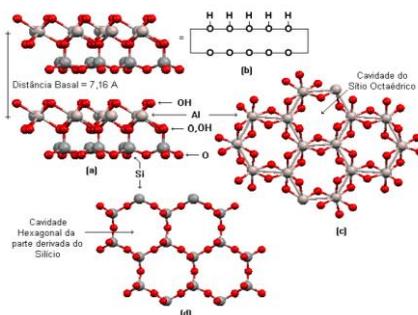
Metacaulim é um material aluminossilicato termicamente ativado, com alta atividade pozolânica, gerado pela calcinação de argilas caulínicas em temperaturas entre 650°C a 800°C, dependendo da pureza e cristalinidade das argilas, e é normalmente chamado de caulim. Outra fonte de obtenção é por meio do tratamento de resíduos da indústria de papel, constituído basicamente de um caulim beneficiado de extrema finura, brancura e pureza (VASSALO, 2013).

O Metacaulim possui em sua composição elementos essenciais para produção de geopolímeros, entre eles SiO_2 , cerca de 52%, e Al_2O_3 com aproximadamente 40%. Os outros 8% são considerados impurezas, e os elementos que as compõem são quartzo e outros argilominerais como o feldspato, a mica, gipsita, ferro e materiais orgânicos (NITA, 2006).

Metacaulim 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).

Os caulins são formados pelo empilhamento regular de lamelas do tipo 1:1 de tetraedros de sílica e octaedros de gipsita ligadas entre si pelas ligações de hidrogênio, produzindo uma estrutura coesa apresentada na Figura 5.

Figura 5: Representação esquemática da estrutura da caulinita (a), da lamela (b), visão superior (c) e inferior (d) da lamela.



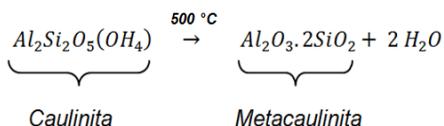
Fonte: Vassalo (2013).

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.

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).

Dentre os diversos caulins utilizados para a produção de pozolanas, citam-se, por exemplo, a caulinita e a haloisita que, quando convertidas a metacaulim, são denominadas, respectivamente, metacaulinita e metahaloisita. A conversão de caulim em metacaulim é apresentada na Figura 6 (NITA et al., 2004).

Figura 6: Conversão de caulim em metacaulim.



Fonte: Nita et al (2004).

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 estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Composição química da argila caulínica.

Composto	Argila Caulínica Típica	Caulim Teórico
SiO_2	>40,0% e <60,0%	46,54%
Al_2O_3	>25,0% e <45,0%	39,50%
FeO_3	<0,8%	-
Na_2O	<0,1%	-
K_2O	<3,0%	-
TiO_2	<1,0%	-
CaO	<1,0%	-
H_2O	>8,0% e <18,0%	13,96%
Outros	<1,0%	-
Relação Al_2O_3/SiO_2	-	-

Fonte: Netto (2006).

O metacaulim é estudado devido suas elevadas propriedades pozolânicas e seu elevado grau de pureza devido às baixas reações de substituição isomórfica.

Para Rocha (2005), a produção de metacaulim, em geral, se resume às seguintes etapas:

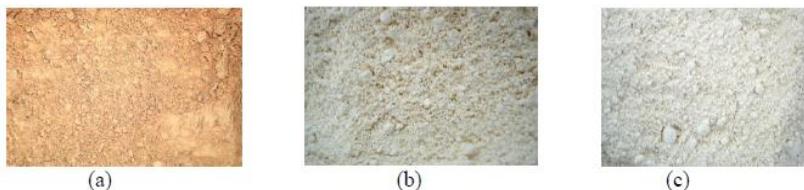
- Prospecção de argila caulinita
- Beneficiamento e eliminação de impurezas
- Secagem
- Calcinação
- Moagem e Micronização

A etapa final de micronização serve para reduzir o tamanho das partículas garantindo a reatividade do material. Ao final o produto obtido pode se apresentar com diferentes graus de finura, superfície específica e coloração.

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. A Figura 7 mostra três tipos de metacaulim produzidos por três empresas diferentes e pode-se observar as diferentes colorações entre elas. Metacaulim do Brasil (a), Advanced Cement Technologies (b) e Engelhard (c), respectivamente.

Figura 7: Tipos de Metacaulim: Metacaulim do Brasil (a), Advanced Cement Technologies (b) e Engelhard (c).



Fonte: Rocha e Vasconcelos (2006).

Segundo Rocha e Vasconcelos (2006), os teores de silício e alumínio variam de 52 a 58% e 34 a 39%, respectivamente para as três amostras citadas na Figura 7.

As fontes de metacaulim usadas em geopolímero variam muito em tamanho de partícula, pureza e cristalinidade da origem da caulinita,

embora, quando adicionadas à mistura, a dispersão dessas partículas afeta muito pouco o comportamento reológico e o grau de reação alcali-ativado (LI et al., 2010).

Os materiais pozolânicos são classificados, segundo a norma NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2012) que classifica os materiais pozolânicos em três classes: N, C e E. De modo geral, na classe N se enquadram tanto pozolanas naturais quanto artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas, argilas calcinadas e o metacaulim.

2.3 PÓ DE ALUMÍNIO

O alumínio em pó é um suprimento altamente inflamável criado pelo processo de moagem de alumínio em grãos finos. No passado, este pó metálico inflamável foi usado na fotografia para criar flashes brilhantes durante uma sessão fotográfica. Atualmente, o pó de alumínio é uma das matérias primas utilizadas em diversas aplicações de pirotecnia, incluindo a criação de fogos de artifício. Recentemente, o uso do pó de alumínio tem sido estudado para outras áreas, como por exemplo, na indústria moveleira, químicas, siderúrgica, como combustíveis sólidos, entre outras aplicações.

Esta diversidade de aplicações do pó de alumínio atomizado só é possível por poder ser produzido em diferentes faixas granulométricas (padronizadas ou sob consulta específica) e grau de purezas (percentual de alumínio e outros metais), o que possibilita assim sua versatilidade em sua utilização.

A indústria da construção civil iniciou estudos para a aplicação destes pós de alumínio com a proposta de garantir propriedades mecânicas, porém com a incorporação de poros na matriz cimentícia.

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).

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 8.

Figura 8: Concreto Celular



Fonte: Gruppi Concreto (2016).

No mundo atualmente não existem muitas patentes relacionadas à transformação de escória de alumínio em agente expansor para concreto celular. A primeira patente foi concedida em 1976 a um pesquisador Russo residente nos Estados Unidos. Essas pesquisas vêm crescendo, sobretudo à aplicação não apenas para concretos celulares, mas também na aplicação em argamassas.

2.4 HIDRÓXIDO DE SÓDIO (NaOH)

O hidróxido de sódio também conhecido como soda cáustica, é usado na indústria principalmente como base química, na fabricação de papel, tecidos, detergentes, alimentos, biodiesel e, por sua alta reatividade é amplamente utilizado em reações químicas atuando como reagentes e/ou catalisadores.

O NaOH é um sólido branco, cristalino, com ponto de fusão igual a 318 °C e que tem a propriedade de absorver água do ar (higroscópico), tornando-se um líquido incolor quando exposto ao ambiente. A Figura 9 demonstra o hidróxido de sódio em escamas.

Figura 9: Hidróxido de sódio em escamas.



Fonte: Autor (2017).

Segundo Pinto (2004), os ativadores mais utilizados na obtenção dos geopolímeros são os hidróxidos de sódio e de potássio, o carbonato de sódio, os silicatos de sódio ou potássio e, sobretudo a mistura destes compostos. Denomina-se ativador simples quando é utilizado somente um composto e ativador composto, quando há a mistura de compostos alcalinos.

Neste trabalho, foi utilizado o hidróxido de sódio como ativador e que por sua vez tem a função de acelerar a solvatação da escória, favorecer a formação de hidratos estáveis e de uma estrutura em rede dos hidratos presentes na matriz.

2.5 SILICATO DE SÓDIO

O silicato de sódio é um líquido de aspecto opalescente e bastante viscoso, também conhecido como vidro líquido ou água de vidro, conforme demonstrado na Figura 10. É um composto utilizado em cimentos, proteção passiva ao fogo, refratários, produção de têxteis e madeira. Dentre diversas aplicações, na construção civil ele é utilizado como um importante agente redutor de viscosidade e eflorescência.

Eflorescência é definida como depósitos cristalinos de cor branca que surgem na superfície do revestimento, como piso, paredes e tetos, resultantes da migração e posterior evaporação de soluções aquosas salinizadas (SANTOS; SILVA FILHO, 2008). Basta apenas que a umidade atinja o local para que a eflorescência ocorra, já que nos materiais é de sua natureza conter sais solúveis. O efeito da

eflorescência pode ser minimizado com a adição de silicato de sódio (Na_2SiO_3).

Figura 10: Silicato de sódio



Fonte: Autor (2017).

2.6 AGREGADOS

Agregado é um material granular, sem forma ou volume definido, de dimensões e propriedades adequadas às obras de engenharia, em particular a fabricação de concretos e argamassas de cimento Portland (SBRIGHI NETO, 2011).

Os agregados podem ser classificados em naturais, britados, artificiais e reciclados. Os agregados naturais são encontrados na natureza já preparados para o uso, como areia de rio, o pedregulho e a areia de cava. Os agregados britados são submetidos a processos de cominuição como a pedra britada. Os agregados artificiais são derivados de processos industriais como a argila expandida. E os agregados reciclados poder ser resíduos granulares que tenham propriedades adequadas para o uso como agregados (PEREIRA. 2014).

Em relação à dimensão dos grãos, são classificados como agregados graúdos e agregados miúdos. Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005), o agregado graúdo cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 125 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, já os agregados miúdos, aqueles cujos grãos passam na peneira com abertura de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de 0,075 mm.

Segundo Farias e Palmeira (2007), os índices físicos revelam propriedades inerentes a um dado material, ou seu estado e estrutura

atuais. A umidade, a absorção, a massa específica e a porosidade estão entre os índices físicos importantes em um agregado.

A formulação de argamassas adequadas ao uso depende do estabelecimento de exigências para a granulometria da areia (CARASEK, 2007). A distribuição granulométrica da areia determina o volume de vazios a ser preenchido pela pasta aglomerante (FARIAS; PALMEIRA, 2007). O estudo da distribuição dos diversos tamanhos de grãos numa massa de materiais granulares é chamado de análise granulométrica. Há dois tipos de granulometrias, a contínua, que apresenta partículas de todos os diâmetros, variando entre valores mínimos e valores máximos, e a descontínua, a qual apresenta a falta de alguma fração granulométrica intermediária. Na granulometria uniforme, a maior parte das partículas pertence a apenas uma fração granulométrica, por outro lado, a granulometria contínua apresenta menor volume de vazios a ser preenchido em relação a granulometria descontínuas e uniformes, logo tem menor potencial de retração quando usadas na produção de argamassas.

3 METODOLOGIA

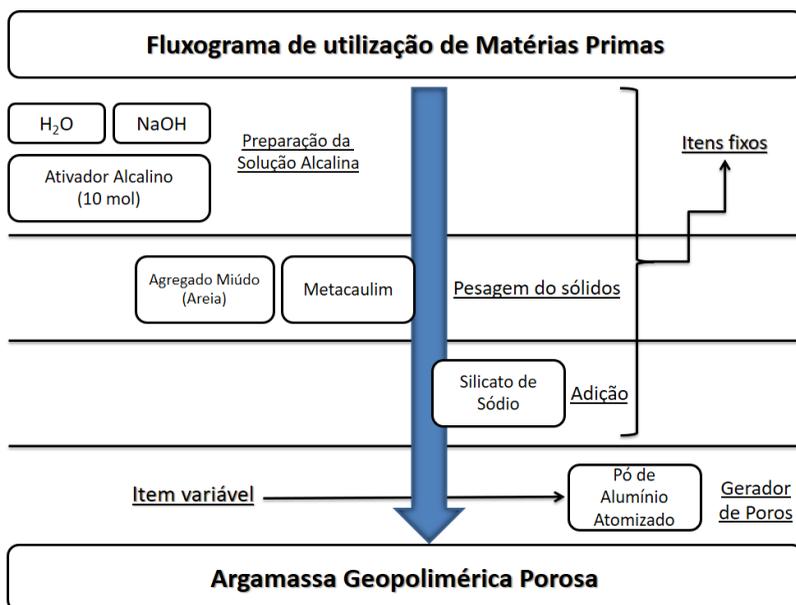
Neste capítulo serão apresentados o plano amostral, os materiais, os métodos e equipamentos utilizados para o desenvolvimento de argamassas geopoliméricas porosas. Inicialmente apresenta-se o plano amostral que direcionou os experimentos.

3.1 PLANO AMOSTRAL

Para uma completa análise dos efeitos causados pelo pó de alumínio nas amostras geopolimérica, um plano experimental foi elaborado objetivando caracterizar as propriedades das argamassas no estado fresco e no endurecido.

A definição da formulação empregada na pesquisa é apresentada na Figura 11. Como um dos objetivos deste trabalho é avaliar o impacto proporcionado pelo pó de alumínio, procurou-se fixar todos os fatores exceto a quantidade de agente porogênico presente na argamassa.

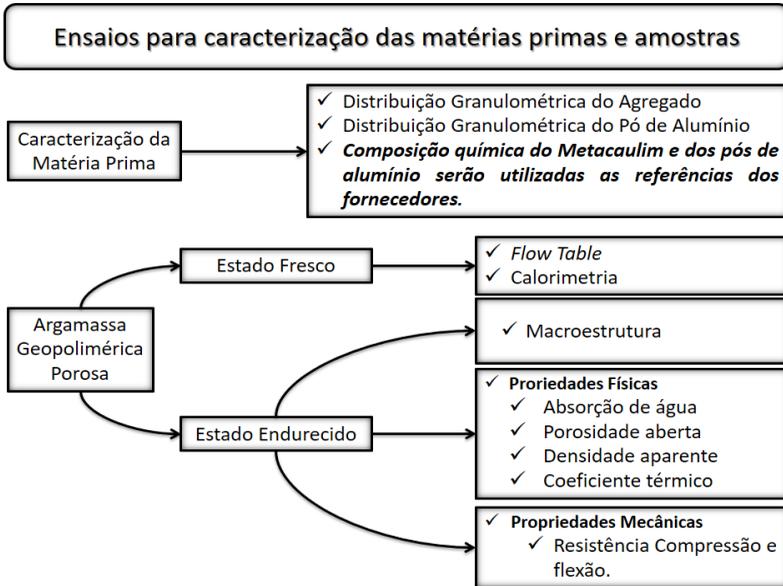
Figura 11: Fluxograma de utilização de matérias primas.



Fonte: Autor (2017).

O plano experimental elaborado prevê caracterizações no estado fresco e endurecido da argamassa geopolimérica, tendo em vista o que é necessário para ter-se um mapa completo da influência do pó de alumínio nas amostras. O esquema que direcionará os estudos é apresentado na Figura 12.

Figura 12: Esquema para a caracterização das matérias primas e amostras.

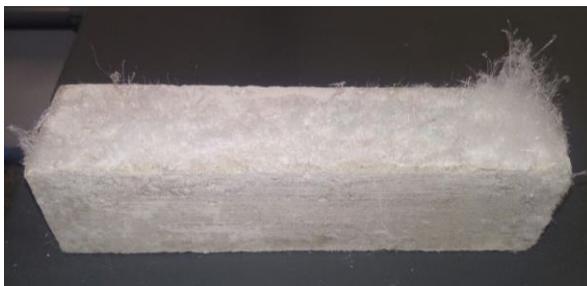


Fonte: Autor, 2017

Os corpos de prova foram confeccionados no Laboratório de Materiais de Construção do Centro Universitário Católica de Santa Catarina em Joinville e os ensaios foram realizados nos laboratórios da Universidade Federal de Santa Catarina em Joinville e Florianópolis e no Centro Universitário Católica de Santa Catarina em Joinville.

Ao todo, foram produzidos 132 corpos de prova prismáticos no padrão 4x4x16 cm, sendo três réplicas de cada formulação para 7 e 28 dias de maturação. Até que a formulação da amostra fosse definida como ideal inúmeras amostras foram confeccionadas na busca pela eliminação da eflorescência, processo este proveniente da oxidação resultante de reações químicas, estabilização da argamassa por conta da expansão da porosidade. A Figura 13 apresenta algumas amostras com a eflorescência.

Figura 13: Amostra de uma argamassa geopolimérica com eflorescência.



Fonte: Autor (2017).

Antes de se amostrar um material é necessário definir as características principais do plano de amostragem, tendo como base o objetivo da amostragem e o conhecimento visto sobre o assunto, e efetivamente o que se pretende extrair da análise do resultado dos fenômenos. Alguns dos problemas encontrados ao realizar ensaios são decorrentes da necessidade de estudar simultaneamente o efeito dos fatores que compõem a amostra, com diferentes níveis, o que torna os experimentos industrialmente inviáveis, visto que os custos e o tempo da execução são elevados.

As técnicas de amostragem, tal como o planejamento experimental, são amplamente utilizadas nas pesquisas científicas e de opinião para se conhecer alguma característica da população.

A nomenclatura original do pó de alumínio do fabricante foi alterada para facilitar o entendimento e descrição no desenvolvimento do trabalho, e estão descritos conforme segue na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3: Nomenclatura dos Pós de Alumínio.

Identificação do Fabricante	Identificação adotada
Tipo 1401	Fino
Tipo 101	Médio
Tipo 13	Grosso

Fonte: Autor (2017).

Com o auxílio do Programa *Statistica 10*, foi montado o plano de amostragem – DOE (Planejamento dos Experimentos). A Tabela 4 demonstra como foi realizada a incorporação do pó de alumínio na

matriz geopolimérica. O valor correspondente a esta incorporação é de 0,05% em massa (g) do dos pós de alumínio atomizado em relação a massa total dos sólidos (Metacaulim e agregado) da matriz geopolimérica.

Tabela 4: Quantidades utilizada de pó de alumínio para a formulação das misturas.

Formulação	Tipo Fino (%)	Tipo Médio (%)	Tipo Grosso (%)
REF	0,00	0,00	0,00
A	100	0,00	0,00
B	0,00	100	0,00
C	0,00	0,00	100
D	50,0	50,0	0,00
E	50,0	0,00	50,0
F	0,00	50,0	50,0
G	33,3	33,3	33,3
H	66,6	16,6	16,6
I	16,7	66,6	16,6
J	16,7	16,7	66,6

Fonte: Autor (2017).

Para garantir maior assertividade e interpretação dos resultados foram realizadas três réplicas para cada formulação. A preparação da argamassa geopolimérica foi feita a uma razão de sólido/liquido (S/L) de 1,2 em massa (L= 55% NaOH + 45% Na₂SiO₃), a relação metacaulim (Mk) e areia (agregado) foi de 1:2. A adição de pós foi nos respectivos valores apresentados na tabela 3.

A análise estatística dos resultados dos ensaios ao logo desta pesquisa foi realizada com o auxílio do Programa *Statistica* 10.0 (*StatSoft* in., 2011), admitindo um nível de significância (p) < 0,05 e o coeficiente de determinação (R^2) de 0,90.

A significância estatística de um resultado é uma medida estimada do grau em que este resultado é "verdadeiro". Quanto menor o valor de "p", maior a influência do fator ou da interação entre os fatores na propriedade analisada. Especificamente, o nível-p representa a probabilidade de erro envolvida em aceitar o resultado observado como válido, isto é, como "representativo da população".

O indicador R^2 , ou seja, o coeficiente de determinação, é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico utilizado em relação aos valores observados e que variam entre 0 e 1, percentualmente.

Quanto maior o R^2 , mais acertado está o modelo utilizado, ou seja, melhor ele se ajustou a amostra. A inclusão de inúmeras variáveis, mesmo que tenha muito pouco poder explicativo sobre a variável dependente, aumentará o valor de R^2 . Isto incentiva a inclusão indiscriminada de variáveis, prejudicando o princípio da parcimônia. Para combater esta tendência, podemos usar uma medida alternativa do coeficiente de determinação, que penaliza a inclusão de regressões pouco explicativos, chamado então de R^2 ajustado, que deve apresentar valores ligeiramente menores que o R^2 , ou seja, o R^2 ajustado é o coeficiente múltiplo de determinação R^2 modificado de modo a levar em conta o número de variáveis e o tamanho da amostra. Esses dados são obtidos no Programa *Statistica*. Apenas para ilustrar, a equação 7 representa como se calcula o R^2 ajustado.

Equação 1 - Equação para cálculo do R^2 ajustado.

$$R^2_{\text{ajustado}} = 1 - \frac{(n - 1)}{[n - 1(k + 1)]} (1 - R^2) \quad (7)$$

Onde:

- n = tamanho da amostra;
- k = número de variáveis independentes.

3.2 MATERIAIS

Neste momento serão apresentados os materiais e constituintes utilizados para o desenvolvimento da pesquisa em matrizes geopoliméricas porosas.

3.2.1 Metacaulim (Mk)

Para produção da argamassa geopolimérica foi utilizado o Metacaulim HP Ultra, fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda. – Jundiaí/SP, como fonte de alumina e sílica.

A Tabela 5 apresenta a composição química do Metacaulim da empresa Metacaulim do Brasil, fabricante do Metacaulim ativado neste trabalho.

Tabela 5: Propriedades e composição Físico-Químicas do Metacaulim.

Propriedades Físico-Químicas	Valores típicos	Valores limites (NBR 15.894)
SiO₂	57%	44% a 65%
Al₂O₃	34%	32% a 46%
CaO + MgO	< 0,1%	< 1,5%
SO₃	< 0,1%	< 1%
Na₂O	< 0,1%	< 0,5%
Eq.Alcalino Na₂O	< 1,5%	< 1,5%
Fe₂O₃	2%	-
TiO₂	1,50%	-
Umidade	0,50%	< 2%
Perda ao Fogo	3%	< 4%
Resíduo #325	6%	< 10%
Desempenho com Cimento (7 dias)	115%	> 105%
Atividade Pozolânica Chapelle	880mg Ca(OH) ₂ /g	> 750mg Ca(OH) ₂ /g
Área Específica BET	230.000cm ² /g	150.000cm ² /g
Massa Específica	2,56kg/dm ³	-

Fonte: Metacaulim do Brasil (2017).

A composição em frações do Metacaulim utilizado nesta pesquisa está apresentada na Tabela 6:

Tabela 6: Composição química do Metacaulim.

Metacaulim (Metacaulim do Brasil)	
<i>Caulim Calcinado (Pó)</i>	
Composto	Valores (%)
SiO₃	57
Al₃O	34
Fe₂O₃	2
Outros	7

Fonte: Metacaulim do Brasil (2017).

3.2.2 Hidróxido de Sódio (NaOH)

Para ativação alcalina foi utilizado o hidróxido de sódio em escamas, comprado na Indústria Química Buschle & Lepper S.A., Joinville. Algumas propriedades físico-químicas do hidróxido de sódio são apresentadas na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7: Propriedades Físico-Químicas do Hidróxido de sódio.

Propriedades Físico-química do Hidróxido de Sódio	
Massa Molecular	40 g/mol
Concentração	> 97%
pH	12,7 (solução de 01 mol/L)
Densidade aparente	2,138 g/cm ³ .
Solubilidade em água	109 g em 100 g de H ₂ O.
Ponto de ebulição/intervalo de ebulição	1390°C (Solução com 90% a 95% de NaOH em peso)
Ponto de fusão	318°C

Fonte: Buschle & Lepper (2017).

A água utilizada para preparar a solução líquida de hidróxido de sódio (NaOH) foi destilada no Laboratório de Química Tecnológica do Centro Universitário Católica de Santa Catarina em Joinville. A solução de NaOH foi preparada com uma concentração de 10 mol por litro.

3.2.3 Pó de Alumínio Atomizado

O pó de alumínio utilizado nesta pesquisa foi o precursor dos poros quando em contato com um meio alcalino, neste caso a solução líquida de NaOH (10 mol/L). O material foi fornecido pela Alcoa do Brasil, situada em Poços de Caldas, Minas Gerais. Foram analisados três tipos diferentes de pós. Informações técnicas sobre os pós de alumínio são apresentadas na Tabela 8:

Tabela 8: Informações técnicas dos pós de Alumínio.

Tipo	Al (%)	Fe (%)	Si (%)	Outros Metais - Total (%)
Fino	99,8	0,17	0,06	0,01
Médio	99,7	0,21	0,05	0,02
Grosso	99,7	0,20	0,06	0,02

Fonte: Alcoa do Brasil (2016).

Análises granulométricas das amostras dos pós de alumínio foram realizadas 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* apresentado na Figura 14.

Figura 14: Equipamento para determinar a distribuição total das partículas.



Fonte: Autor (2017).

3.2.4 Silicato de Sódio (Na_2SiO_3)

Solução de silicato de sódio neutro com molaridade de 3,44 mol/L é um produto comercialmente fornecido pela empresa Buschle & Lepper S.A.. Este produto é fornecido na forma de um líquido viscoso e de aspecto opalescente, também conhecido como vidro líquido ou água de vidro.

Algumas aplicações do silicato de sódio podem ser citadas como em fundições como agente de ligação para areia em moldes e machos, nas indústrias têxteis para manter o valor do pH controlado e estabilizar o banho, entre outras aplicações diversas. Na indústria da construção civil, o silicato de sódio é um composto utilizado com o cimento na

proteção passiva ao fogo e como refratários. A aplicação de silicato de sódio gera elevada economia e qualidade nas argamassas, concretos e pastas cimentícias. Nesta pesquisa o silicato de sódio será utilizado como inibidor de eflorescência.

Características físico-químicas do silicato de sódio são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9: Características físico-químicas do silicato de sódio.

Determinação	Especificação
Densidade a 25°C (g/cm³)	1,390 - 1,420
Viscosidade (cP)	250 - 500
Óxido de sódio (%)	8,50 - 9,20
Óxido de silício (%)	27,80 - 30,50
Sólidos totais (%)	37,00 - 39,00
Relação (SiO₂)/(Na₂O)	3,02 - 3,59
Água (%)	61,00 - 63,00

Fonte: Buschle & Lepper S.A. (2017).

3.2.5 Agregado Miúdo – Areia média

O agregado miúdo utilizado nesta pesquisa é a areia de leito de rio lavada da marca Cibloco, adquirida em comércio de materiais de construção.

3.3 MÉTODOS

A caracterização das argamassas geopoliméricas foi realizada em duas condições, no estado fresco e no estado endurecido. A seguir, serão descritos os métodos em seus respectivos estados.

3.3.1 Distribuição granulométrica do agregado

O ensaio de granulometria seguiu a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). O mesmo foi realizado no Laboratório de Materiais no Centro Universitário Católica de Santa Catarina em Joinville. O conjunto de peneiras utilizados para mensurar a granulometria do agregado é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Distribuição do conjunto de peneiras.

Peneira	Abertura	Malha / Mesh
01	9,50 mm	3/8''
02	6,30 mm	1/4''
03	4,75 mm	4
04	2,36 mm	8
05	1,18 mm	16
06	600 μm	30
07	300 μm	50
08	150 μm	100

Fonte: Autor (2017).

3.3.2 Preparação das amostras

Os corpos de provas foram confeccionados de acordo com a norma NBR 13279 (ABNT, 2005). Os corpos de provas utilizados possuem dimensões de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ e estão de acordo com a norma NBR 13275 (ABNT, 2005). A Figura 15 representa o molde onde foram preparadas as amostras para posterior ensaio de resistência à compressão e tração na flexão.

A particularidade na preparação das amostras está voltada ao ensaio de determinação do índice de consistência no item 3.3.3.2, onde as amostras com a incorporação do agente porogênico não puderam sofrer os adensamentos pois destruiriam os poros da matriz geopolimérica, conforme prevê a norma NBR 13.276 (ABNT, 2005), pois o fator principal do estudo desta pesquisa é a formação dos poros, sendo o confecção das amostras realizado em uma argamassadeira apresentada na Figura 16.

Figura 15: Molde para confecção das amostras.



Fonte: Autor (2017).

Figura 16: Argamassadeira.



Fonte: Autor (2017).

A Tabela 11 apresenta as diferentes formulações e seus constituintes para a preparação e confecção das amostras para a determinação das propriedades mecânicas e físicas.

Tabela 11: Formulações e constituintes das amostras para os ensaios de propriedades mecânicas e propriedades físicas.

Amostra	MK (g)	Agregado (g)	Solução de NaOH (g)	Solução de Silicato (g)	Pó Al (g)		
					Fino	Médio	Grosso
REF	100	200	61,65	60,48	-	-	-
A	100	200	61,65	60,48	0,150	0,000	0,000
B	100	200	61,65	60,48	0,000	0,150	0,000
C	100	200	61,65	60,48	0,000	0,000	0,150
D	100	200	61,65	60,48	0,075	0,075	0,000
E	100	200	61,65	60,48	0,075	0,000	0,075
F	100	200	61,65	60,48	0,000	0,075	0,075
G	100	200	61,65	60,48	0,050	0,050	0,050
H	100	200	61,65	60,48	0,100	0,025	0,025
I	100	200	61,65	60,48	0,025	0,100	0,025
J	100	200	61,65	60,48	0,025	0,025	0,100

Fonte: Autor (2017).

O processo de confecção das diferentes amostras é apresentado abaixo:

✓ No recipiente da argamassadeira, adicionou-se o NaOH e a solução de silicato de sódio e deixar-se misturar em velocidade baixa (60 rpm) por 5 minutos com a intenção de homogeneizar a fração líquida;

✓ Adicionar o volume de Mk na argamassadeira e deixar misturar por 5 minutos.

✓ Adicionou-se o agregado e misturou-se por mais 5 minutos.

✓ Com a argamassadeira em velocidade baixa, adicionar o pó de alumínio e após aproximados 30 segundos vazou-se a argamassa nos moldes.

✓ Retirou-se o excesso de argamassa do molde com o auxílio de uma régua metálica.

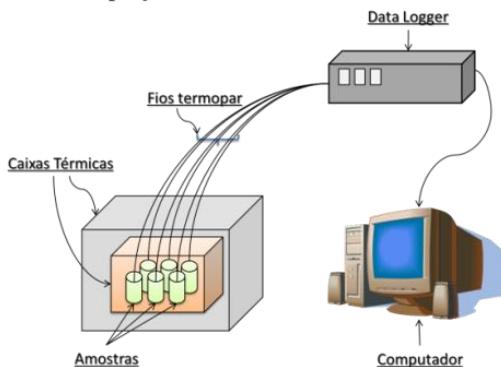
✓ Aguardou-se aproximados 2 minutos, para acondicionar o molde em estufa a uma temperatura de 50 °C para o processo de cura por 24 horas.

3.3.3 Caracterização no estado fresco

3.3.3.1 Calorimetria

O ensaio de calorimetria foi realizado para visualizar o tempo de início de pega, o qual varia de acordo com a dosagem do pó de alumínio em cada amostra. Entende-se por pega um processo no qual a pasta de cimento Portland – e, por conseguinte o concreto ou argamassa produzido – é convertido em um material rígido que perdeu sua deformabilidade, passando a resistir a esforços externos suficientes para comportar-se como um sólido. Essa mudança no material reflete-se e caracteriza-se por uma mudança brusca da viscosidade aparente. A evolução do calor de hidratação foi avaliada por um calorímetro modelo KEYSIGHT 34972A com módulo inteligente de vinte canais de entrada para Termopar /mV/V/mA do laboratório de Materiais da UFSC. A temperatura externa ao sistema de acondicionamento das amostras foi mantida constante à 21°C durante as 24 horas em que ocorreu o período de aquisição dos dados. A Figura 17 apresenta o esquema de captação de dados do ensaio e a Figura 18 um exemplo de equipamento de coleta de dados.

Figura 17: Esquema de captação de dados do ensaio de calorimetria.



Fonte: Autor (2017).

Figura 18: Calorímetro KEYSIGHT 34972A em coleta de dados.



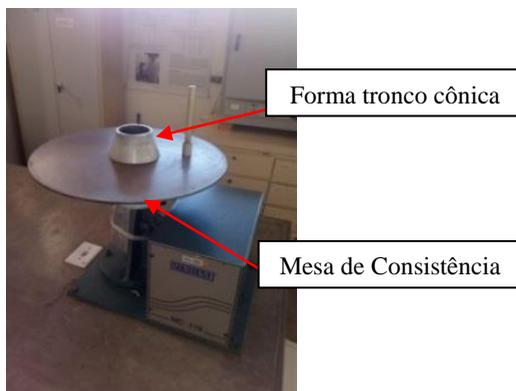
Fonte: Autor (2017).

A coleta de dados é realizada pelo *Software BenchLink Data Logger 3* para aquisição de sinais analógicos, com capacidade de vinte pontos distintos, projetado para visualização simultânea na forma gráfica, analógica e possibilitando o salvamento automático dos valores.

3.3.3.2 Índice de consistência

Para a determinação da relação sólido/líquido ideal para um intervalo ideal de aberturas foi realizado o ensaio de índice de consistência. O ensaio visou avaliar a consistência e plasticidade da argamassa através de deformações provocadas por choque ou vibração conforme especificado pela norma NBR 13276 (ABNT, 2005). Consistiu no espalhamento do tronco de cone de argamassa na mesa de consistência (*flow table*), conforme apresentado na Figura 19. O procedimento para este ensaio basicamente consiste das seguintes etapas: o molde tronco-cônico foi centralizado na mesa previamente limpa e seca; com o auxílio de uma espátula, a argamassa foi disposta em três camadas de alturas iguais, adensadas com o soquete com 15, 10, 5 golpes respectivamente; o topo do molde foi raspado com o auxílio de uma espátula; o molde foi removido verticalmente; a manivela da mesa foi girada de modo que realizasse 30 quedas em 30 segundos; na sequência foram medidos três diâmetros com auxílio de uma régua e calculado o índice de consistência através da média aritmética das três medidas.

Figura 19: Mesa de consistência.



Fonte: Autor (2017).

3.3.4 Caracterizações no estado endurecido

3.3.4.1 Análise morfológica

A análise morfológica foi direcionada para as amostras primárias, ou seja, apenas as correspondentes a composição de 100% do respectivo tipo de pó de alumínio, conforme apresentada na Tabela 12.

Tabela 12: Formulação das amostras primárias.

Formulação	Fino (%)	Médio (%)	Grosso (%)
REF	0,0	0,0	0,0
A	1	0,0	0,0
B	0,0	1	0,0
C	0,0	0,0	1

Fonte: Autor (2017).

Devido as dimensões dos poros formados durante o processo de reação na matriz geopolimérica serem em escala milimétrica, as imagens foram obtidas por câmera de alta definição da marca Nikon e modelo D3100.

3.3.4.2 Caracterização das propriedades físicas

3.3.4.2.1 Absorção de água por imersão, porosidade aberta e densidade aparente.

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 na Tabela 03 com 28 dias de cura. Os resultados destes ensaios são correlacionados com os resultados de propriedade mecânica que estão apresentados na sessão 4.4.

A realização destes ensaios consistiu nas seguintes etapas:

- Secagem das amostras em estufa à temperatura de aproximadamente 105 °C ($\pm 5^\circ\text{C}$), sendo posteriormente resfriadas até atingirem 23°C ($\pm 2^\circ\text{C}$);
- Pesagem das amostras em balança de precisão com sensibilidade de 0,025% da massa das amostras;
- Imersão dos corpos de prova por 72 horas;
- Secagem da superfície das amostras e pesagem da massa do corpo de prova (CP).

A seguir serão apresentadas as equações correspondentes às respectivas propriedades a serem analisadas. Para o cálculo da absorção de água por imersão será utilizada a Equação 01, para o índice de vazios ou porosidade aberta a Equação 02, para a massa específica ou densidade aparente na amostra seca a Equação 03, para a massa específica ou densidade aparentes na amostra saturada a Equação 04.

Equação 2 - Absorção de água por imersão

$$A_i = \frac{M_{sat} - M_S}{M_i} \quad (100) \quad (\text{adimensional}) \quad (1)$$

Equação 3 - Índice de vazios ou porosidade aberta

$$Pa = \frac{M_{sat} - M_S}{M_{sat} - M_i} \quad (100) \quad (\text{adimensional}) \quad (2)$$

Equação 4 - Massa específica ou densidade aparente na amostra seca

$$Das = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \quad \left(\frac{g}{cm^3}\right) \quad (3)$$

Equação 5 - Massa específica ou densidade aparente na amostra saturada

$$Dasat = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_i} \quad \left(\frac{g}{cm^3}\right) \quad (4)$$

Onde:

- A_i = Absorção por imersão
- Pa = Porosidade aberta
- Das = Densidade aparente de amostra seca
- $Dasat$ = Densidade aparente de amostra saturada
- M_{sat} = massa do CP saturado;
- M_s = massa do CP seco;
- M_i = massa do CP saturado, imerso em água;

A Figura 20 apresenta a balança com o dispositivo necessário para fazer as respectivas pesagens dos corpos de prova.

Figura 20: Balança para mensurar o CP imerso em água.



Fonte: Autor (2017).

3.3.4.2.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade será seguido conforme norma NBR 9779 (ABNT, 2003). Para os ensaios foram confeccionados corpos de prova prismáticos com as dimensões de 4 cm de largura, 4 cm de profundidade e 16 centímetros de comprimento. A absorção de água por capilaridade é expressa em g/cm^2 e calculada dividindo-se o delta de massa pela área da seção transversal da superfície do CP. A Equação 05 representa a equação utilizada para a determinação da absorção de água por capilaridade.

Equação 6 - Equação para cálculo da absorção de água por capilaridade.

$$C = \frac{A - B}{S} \quad (5)$$

Onde as variáveis são:

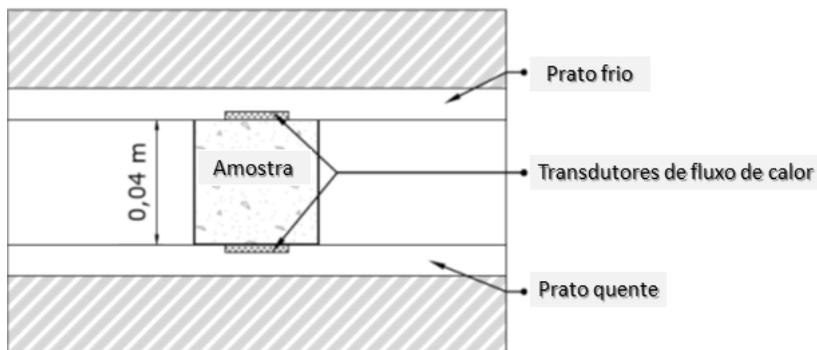
- C – Absorção de água (g/cm^2)
- A – Massa do CP em contato com a água (g)
- B – Massa do CP seco (g)
- S – Área transversal (cm^2)

Foram realizados os ensaios em três CP para cada formulação e em dois tempos diferentes, 10 minutos e 90 minutos.

3.3.4.2.3 Condutividade térmica

O ensaio de condutividade térmica foi baseada 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 21. O mesmo foi realizado em Portugal na Universidade de Aveiro, no laboratório de Engenharia Civil. 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 indicadas na Tabela 3 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 21: Esquema de captação de dados de condutividade térmica



Fonte: Autor (2017)

As medidas de condutividade térmica foram realizadas durante um período mínimo de 12 horas para garantir 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 6:

Equação 7 - Lei de Fourier para calcular a condutividade térmica.

$$\lambda = \frac{S'E' + S''E''}{2} \frac{L}{\Delta t} \quad (6)$$

Onde λ (W / m K) 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 saída 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.

3.3.4.3 Propriedades mecânicas

3.3.4.3.1 Resistência à Compressão e à tração na flexão

As propriedades mecânicas das matrizes geopoliméricas com a incorporação do agente porogênico, o pó de alumínio atomizado, foi medida em ensaio de resistência à compressão e à tração na flexão através da máquina de ensaios universal – Modelo EMIC 10 Toneladas,

apresentado na Figura 22, realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos no Centro Universitário Católica de Santa Catarina.

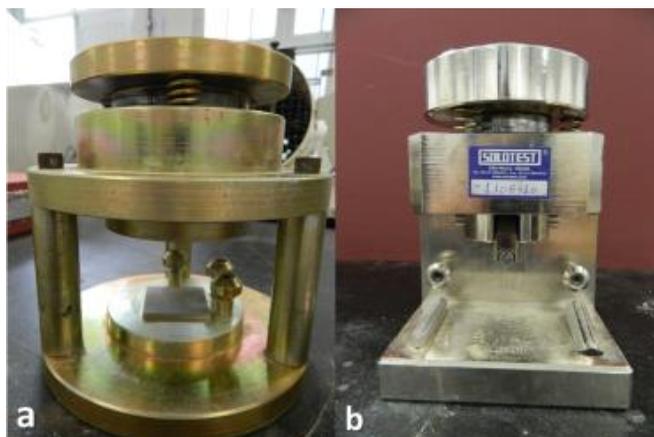
Figura 22: Máquina de Ensaios Universal.



Fonte: Autor (2017).

As amostras foram submetidas a estes ensaios 24 horas e 28 dias após a sua confecção. Ambas foram armazenadas nas primeiras 24 horas em um forno à 50°C e, posteriormente armazenadas em temperatura ambiente. A Figura 23 representa os acessórios para o rompimento das argamassas (ensaios de compressão (a) e tração na flexão (b)).

Figura 23: Acessórios: a) Ensaio de resistência à compressão, b) Ensaio de resistência à tração na flexão;



Fonte: Autor (2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

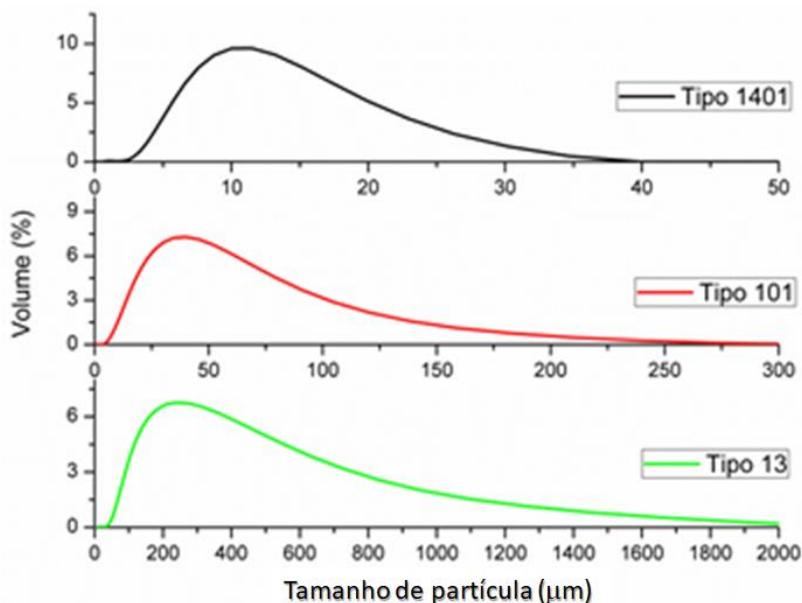
Este capítulo apresenta a discussão dos resultados dos procedimentos experimentais dos principais pontos desta pesquisa. O capítulo foi dividido em 3 seções: a seção 4.1 apresenta os resultados e discussões a respeito da caracterização granulométrica do agregado e do pó de alumínio; a seção 4.2 trata da caracterização no estado fresco da argamassa geopolimérica e a seção 4.3 apresenta a caracterização no estado endurecido da argamassa geopolimérica.

4.1 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

4.1.1 Granulometria do pó de alumínio atomizado

A distribuição granulométrica dos três tipos de pó de alumínio estudados, descritos pelos códigos tipo 1401, 101 e 13, é apresentada na Figura 24.

Figura 24: Distribuição granulométrica do pó de alumínio.



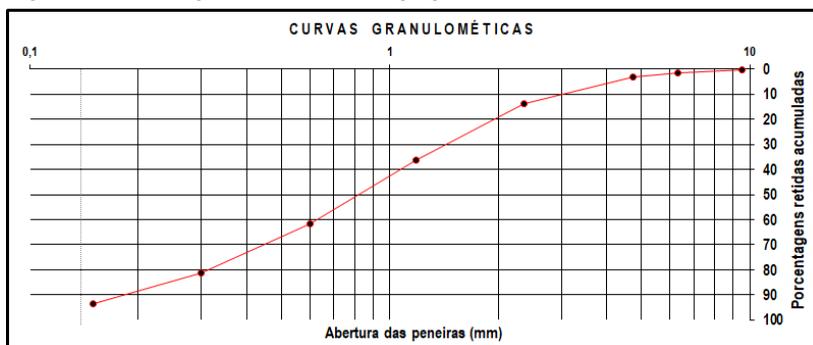
Fonte: Autor (2017).

Os resultados da granulometria do pó de alumínio tipo 1401 indicam que a maioria dos grãos se encontra na faixa de 10 μm , para o pó de alumínio tipo 101 encontram-se na faixa de 35 μm e para o pó de alumínio tipo 13 na faixa de 213 μm .

4.1.2 Distribuição granulométrica do agregado

Foram realizados dois ensaios para determinação da granulometria do agregado miúdo. O resultado do ensaio granulométrico do agregado utilizado na pesquisa é apresentado na Figura 25.

Figura 25: Ensaio granulométrico do agregado.



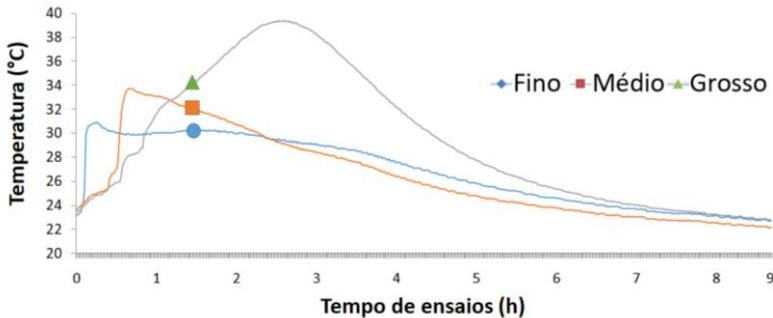
Fonte: Autos (2017).

O gráfico de granulometria apresentado na Figura 25 indica que o material utilizado, ou seja, o agregado miúdo apresentou uma curva em “S” suave, indicando uma granulometria contínua da amostra, o que resulta em um melhor empacotamento dos grãos. Isso significa que se tem um número menor de espaços vazios entre os grãos.

O agregado foi classificado como areia grossa, utilizando módulo de finura e a curva granulométrica da NBR 7211 (ABNT, 2003), representada na Figura 26. O módulo de finura obtido foi de 2,90.

comportamento uniforme e similar, como mostra a Figura 27, que apresenta um gráfico do resultado do ensaio de calorimetria. Após 16 horas no ensaio atingiu a temperatura ambiente, que permaneceu controlada em 21 graus durante todo o ensaio. Conforme pode ser observado nos resultados deste ensaio, a matriz com adição de pó de alumínio com a granulometria fina obteve o menor tempo de reação, seguida da com granulometria média e granulometria grossa respectivamente. Os picos de temperaturas maiores e o tempo necessário para atingir esses picos são apresentados na Tabela 14.

Figura 27: Ensaio de calorimetria das argamassas geopoliméricas com máximo de adição do agente gerador de poros.



Fonte: Autor (2017).

Tabela 14: Resultado de calorimetria por tipo de granulometria do pó de Al.

	Fino	Médio	Grosso
Maior temperatura (°C)	30,92	33,73	39,39
Tempo transcorrido do ensaio para atingir o pico (min)	29:00	57:00	173:00

Fonte: Autor (2017).

Portanto, como mostram os dados obtidos, a adição do pó de alumínio de granulometria fina apresentou uma reação mais breve e menor pico de temperatura máxima, ou seja, 30,92 °C. A adição do pó de granulometria grossa apresentou uma reação mais lenta, atingindo o pico máximo de temperatura (39,39 °C) em aproximadamente 2 horas e 53 minutos. Por fim a matriz que recebeu a adição do pó de granulometria médio atingiu resultados intermediários aos demais, com pico máximo de 33,73 °C em 57 minutos.

O resultado do ensaio de calorimetria para a argamassa geopolimérica com o pó fino percorreu um menor tempo devido a menores tamanho dos poros o que indica maior contato do material com o termostato, enquanto que nos demais ensaios os poros são levemente maiores e possivelmente a argamassa geopolimérica perde contato com o termostato.

4.2.2 Índice de Consistência

O ensaio para determinação do índice de consistência da argamassa foi realizado segundo a NBR 13.276. Os resultados deste ensaio estão apresentados na tabela 15. Os valores representam a média de três ensaios do índice de consistência, realizados para cada uma das formulações descritas na Tabela 16.

Tabela 15: Índices de consistência.

Amostras	Consistência (cm)				Desvio Padrão
	1	2	3	Média	
REF	23,00	23,50	23,00	23,17	0,29
A	26,00	26,00	26,00	26,00	0,00
B	27,50	27,80	27,00	27,43	0,40
C	27,00	27,00	27,00	27,00	0,00
D	24,70	24,70	25,00	24,80	0,17
E	28,10	27,50	27,80	27,80	0,30
F	27,70	28,00	27,60	27,77	0,21
G	27,00	27,50	27,60	27,37	0,32
H	27,00	27,50	27,00	27,17	0,29
I	28,00	28,50	28,00	28,17	0,29
J	26,50	26,50	26,50	26,50	0,00

Fonte: Autor (2017).

Tabela 16: Quantidade de Pós de alumínio por mistura em gramas.

Amostra	Pó Al (g)			S/L
	Fino	Médio	Grosso	
REF	-	-	-	1,20
A	0,75	0,00	0,00	1,20
B	0,00	0,75	0,00	1,20
C	0,00	0,00	0,75	1,20
D	0,38	0,38	0,00	1,20
E	0,38	0,00	0,38	1,20
F	0,00	0,38	0,38	1,20
G	0,25	0,25	0,25	1,20
H	0,50	0,13	0,13	1,20
I	0,13	0,50	0,13	1,20
J	0,13	0,13	0,50	1,20

Fonte: Autor (2017).

Para o índice de consistência da amostra de referência, aquela que não foi adicionado o pó de alumínio, a média da medida do espalhamento foi 23,17 cm. Este valor é consistente com os valores esperados para este índice. Nas demais amostras, houve um relativo aumento no valor do índice de consistência em relação à amostra referência, isto é devido a sua rápida reação de expansão, resultante da reação química de oxidação do pó de alumínio, e conseqüentemente na geração de bolhas. A diferença entre o maior espalhamento (amostra I) e o menor espalhamento (amostra D) foi de 7%.

A amostra de referência é composta pelos elementos apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Constituintes da amostra referência para o ensaio de consistência.

Amostra	Matriz (g)	MK (g)	Agregado (g)	NaOH (g)	Silicato (g)	S/L
REF	3000	1000	2000	616,45	604,84	1,20

Fonte: Autor (2017).

A Figura 28 representa a amostra sobre a mesa de consistência e a Figura 29 o processo de mensuração do espalhamento no processo do ensaio de índice de consistência.

Figura 28: Amostra na mesa de consistência.



Fonte: Autor (2017).

Figura 29: Mensuração do ensaio.



Fonte: Autor (2017).

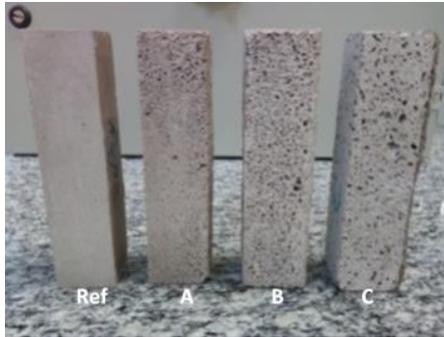
4.3 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 Análise morfológica

A análise morfológica, com imagens captadas com uma câmera de alta definição, permite diferenciar o tamanho dos poros, causadas por diferentes quantidades de pó de alumínio, nas diferentes amostras. As imagens das amostras obtidas após 28 dias de cura.

A Figura 30 ilustra as amostras Ref, A, B e C onde é visível entre elas à diferença do tamanho dos poros e sua distribuição na matriz geopolimérica. Percebe-se que a amostra Ref é constituída de uma matriz sólida sem poros, enquanto que as demais amostras apresentam uma grande porosidade aparente decorrente da oxidação do pó de Al em um meio alcalino.

Figura 30: Diferença de porosidade entre as amostras.

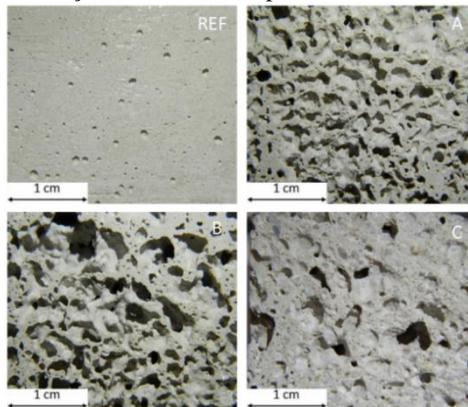


Fonte: Autos (2017).

A Figura 31 apresenta imagens das amostras confirmando que a quantidade de alumínio em pó influencia no tamanho e distribuição dos poros gerados.

A diferente granulometria do pó de alumínio na matriz geopolimérica implica 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 mais grosso têm-se poros maiores enquanto para pó mais fino têm-se poros menores.

Figura 31: Distribuição e tamanho dos poros nas diferentes amostras.



Fonte: Autor (2017).

As amostras com a adição de pó de alumínio de maior granulometria (amostra C) tendem a apresentar maior resistência, pois seus poros são maiores e a parede entre eles é mais espessa, enquanto que 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.

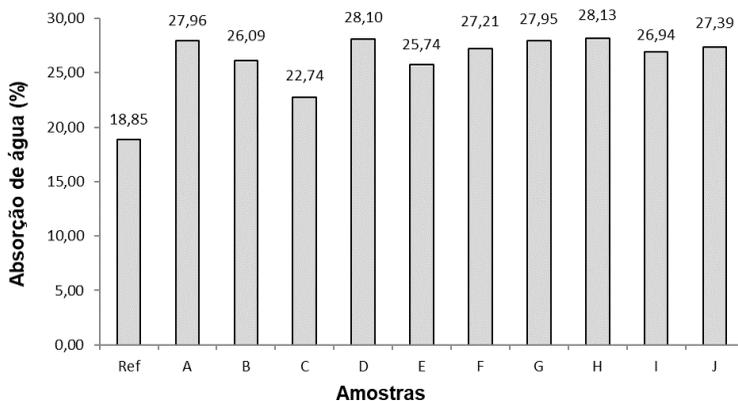
De certa forma, todas as formulações apresentaram boa distribuição de poros ao longo da matriz, o que significa que o processo de adição do pó de alumínio na matriz geopolimérica foi realizado com sucesso.

4.3.2 Caracterização de propriedades físicas e térmicas

4.3.2.1 Absorção de água por imersão

O resultado do ensaio de absorção de água por imersão é apresentado na Figura 32.

Figura 32: Resultado dos ensaios de absorção de água por imersão.



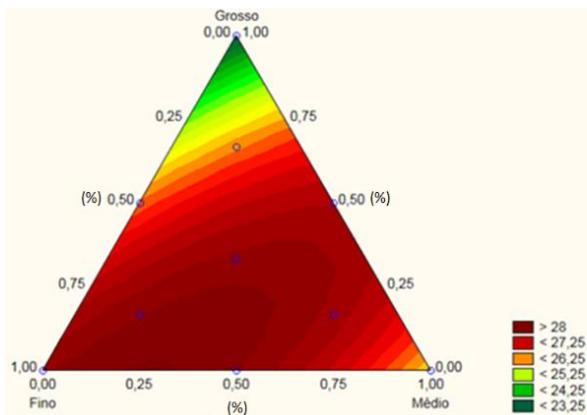
Fonte: Autor (2017).

A média da absorção de água de todas as amostras que foram confeccionadas com a adição de pó de alumínio foi de 26,83%. Já a amostra referência absorveu 18,85%, isto é, aproximadamente 29,74% menos em relação a média das amostras que foram submetidas à adição do agente gerador de poros. Se observarmos, as amostras A, B e C

apresentam uma redução de absorção entre elas. A amostra A foi confeccionada com apenas o pó de alumínio de granulometria fina, a amostra B com apenas o pó de alumínio de granulometria média e por sua vez a C com apenas o pó de alumínio de granulometria grossa. Isso permite concluir que o tamanho dos poros influencia na absorção de água. No entanto, a amostra A tem poros menores, permitindo a permeabilidade de líquido entre os poros, enquanto que as amostras B e C possuem poros maiores, porém menos interligações entre eles, impedindo que o líquido flua no corpo de prova. Quando se observa as demais combinações, percebe-se que com a combinação da adição das diferentes granulometrias de pó de alumínio a absorção se comporta de forma muito similar.

Os valores encontrados para absorção de água por imersão podem ser observados nos gráficos triangulares de curvas de nível. O gráfico apresentado na Figura 33 representa o ensaio de absorção de água imersa e indica a tendência da formulação com maior absorção de água. A Equação 8 apresentada rege o comportamento da absorção de água por imersão sobre os ensaios realizados.

Figura 33: Gráfico de curva de nível do ensaio de absorção de água por imersão.



Fonte: Autor (2017).

Equação 8 - Equação que rege o comportamento de absorção de água por imersão.

$$AI = 27,926F + 25,768M + 23,56G + 4,723FM + 3,267FG + 12,313MG \quad (8)$$

Onde:

AI: absorção de água por imersão (%);

F: granulometria fina do pó de alumínio (%);

M: granulometria média do pó de alumínio (%);

G: granulometria grossa do pó de alumínio (%);

O modelo que melhor se ajustou no experimento foi o modelo *Quadratic*, onde apresentou o nível de significância, em $p = 0,0439$. A variabilidade dos dados apresentados, explicada pela análise de variância reduzida, apresentou um valor de $R^2 = 0,8942$, enquanto que o R^2 ajustado (Radj), foi de 0,7619. Esses resultados indicam que o modelo adotado é significativo. Observamos na Equação 8 que todas as interações entre todos os fatores são significativas e não podem ser desprezadas.

Com o auxílio do Programa *Statistica*, podemos observar que separadamente os elementos são significativos, mas a interação entre FM, assim como FG podem ser desprezadas. A Figura 34 demonstra esse resultado, onde os valores em vermelho indica que são significativos.

Figura 34: Significância dos fatores e suas interações para a absorção de água por imersão.

Coeffs (recoded comps); Var.:Absorção Imersão; R-sqr=.8942; 3 Factor mixture design; Mixture total=1., 10 Runs DV: Absorção Imersão; MS Residual=.655239						
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(4)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
(A)Fino	27,92596	0,780680	35,77135	0,000004	25,75845	30,09347
(B)Médio	25,76778	0,780680	33,00686	0,000005	23,60026	27,93529
(C)Grosso	23,05960	0,780680	29,53785	0,000008	20,89208	25,22711
AB	4,72303	3,598046	1,31267	0,259544	-5,26675	14,71281
AC	3,26667	3,598046	0,90790	0,415283	-6,72311	13,25644
BC	12,31030	3,598046	3,42139	0,026746	2,32053	22,30008

Fonte: Autor (2017).

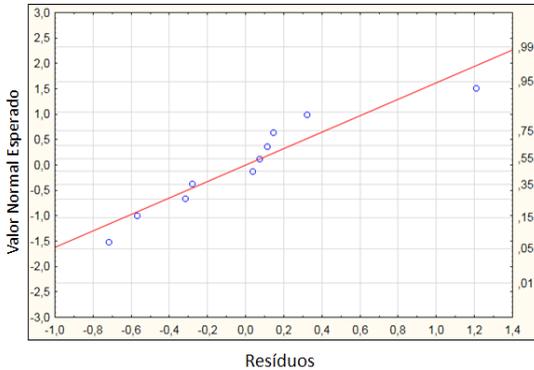
Desta forma reescrevemos a equação desprezando as interações não significativas na Equação 9.

Equação 9 - Equação que rege o comportamento de absorção de água por imersão desprezando as interações não significativas.

$$AI = 27,926F + 25,768M + 23,56G + 12,313MG \quad (9)$$

A absorção de água por imersão apresentou uma tendência normal, conforme pode ser observado na Figura 35 de um gráfico de probabilidade normal elaborado no Programa *Statistica 10*.

Figura 35: Gráfico de probabilidade normal sobre a propriedade de absorção de água por imersão.

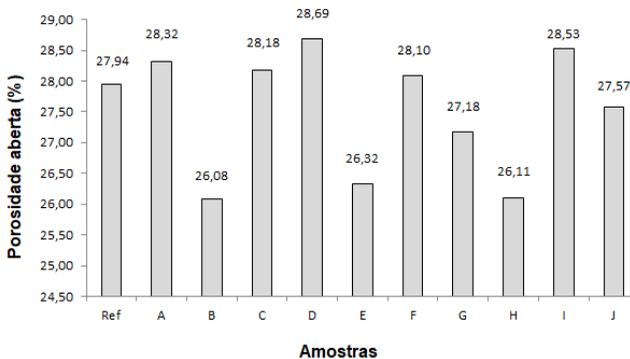


Fonte: Autor (2017).

4.3.2.2 Absorção de água por porosidade aberta

A Figura 36 demonstra o resultado da porosidade aberta, ou seja, índice de vazios.

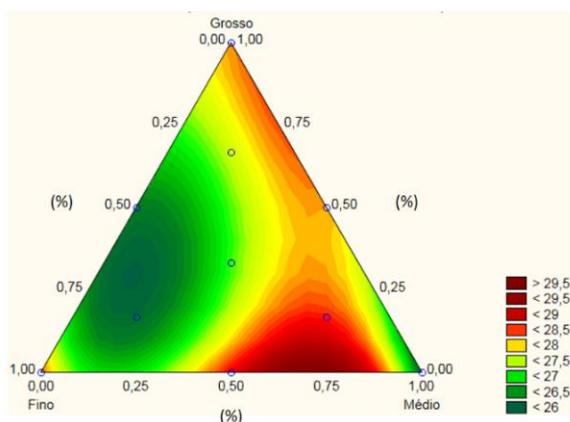
Figura 36: Resultado do índice de porosidade aberta.



Fonte: Autor (2017).

Os valores encontrados para porosidade aberta ou índice de vazios apresentados na Figura 36, podem ser observados no gráfico triangular de curvas de nível, que indicam uma homogeneidade na distribuição da porosidade entre as diferentes formulações, com uma breve redução na combinação entre a adição do pó de alumínio com granulometria fina e granulometria grossa. O gráfico apresentado na Figura 37 representa as curvas de nível para o ensaio de porosidade aberta ou índice de vazios.

Figura 37: Gráfico de curva de nível resultante do ensaio de porosidade aberta.



Fonte: Autor (2017).

Analisando os resultados estatísticos e admitindo nível de significância (p) de 0,05 a o coeficiente de determinação (R^2) de 0,90, o melhor modelo que se ajustou a esse ensaio foi o *Full Cubic*. Neste experimento o resultado do nível de significância para o modelo apresentou $p = 0,00669$. O valor para o coeficiente de determinação foi de $R^2 = 0,99998$ e o coeficiente de determinação R^2 ajustado = 0,9988.

Esses resultados indicam que o modelo adotado é significativo. Observamos na equação 10 que todas as interações entre todos os fatores são significativas e não podem ser desprezadas. Através da análise estatística, observamos que quando analisados os elementos separadamente, tanto quanto em interação com os demais elementos, eles são significativos. A Figura 38 demonstra esse resultado, onde em vermelho indica que são significativos.

Equação 10 - Equação que rege o comportamento da porosidade aberta.

$$PA = 28,319F + 26,079M + 28,179G + 5,956FM - 7,723FG + 3,876MG - 15,861FMG - 20,66FM(F - M) - 5,0FG(F - G) \quad (10)$$

Onde:

PA: porosidade aberta (%);

F: granulometria fina do pó de alumínio (%);

M: granulometria média do pó de alumínio (%);

G: granulometria grossa do pó de alumínio (%);

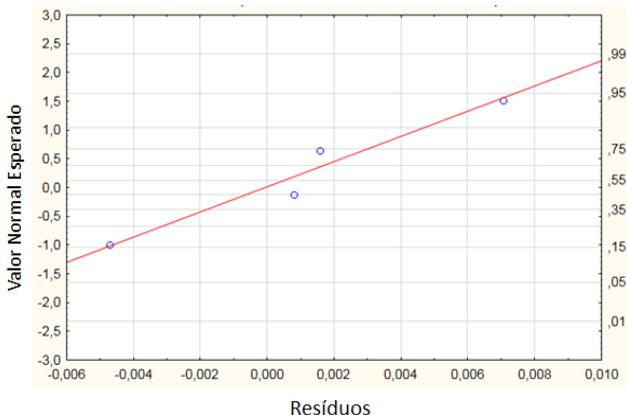
Figura 38: Significância dos fatores e suas interações para a porosidade aberta.

Coeffs (recoded comps); Var.:Porosiade aberta; R-sqr=1.; Adj.: 3 Factor mixture design; Mixture total=1., 10 Runs DV: Porosiade aberta; MS Residual=,0001255						
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(1)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
(A)Fino	28,3192	0,011175	2534,215	0,000251	28,1772	28,4612
(B)Médio	26,0792	0,011175	2333,763	0,000273	25,9372	26,2212
(C)Grosso	28,1792	0,011175	2521,686	0,000252	28,0372	28,3212
AB	5,9569	0,054790	108,722	0,005855	5,2607	6,6530
AC	-7,7231	0,054790	-140,959	0,004516	-8,4193	-7,0270
BC	3,8769	0,054790	70,759	0,008996	3,1807	4,5730
ABC	-15,8612	0,359377	-44,135	0,014422	-20,4275	-11,2949
AB(A-B)	-20,6600	0,182015	-113,507	0,005608	-22,9727	-18,3473
AC(A-C)	-5,0000	0,182015	-27,470	0,023165	-7,3127	-2,6873

Fonte: Autor (2017).

A propriedade de porosidade aberta, observa-se uma tendência normal apresentada na Figura 39.

Figura 39: Gráfico de Probabilidade normal sobre a propriedade da porosidade aberta.

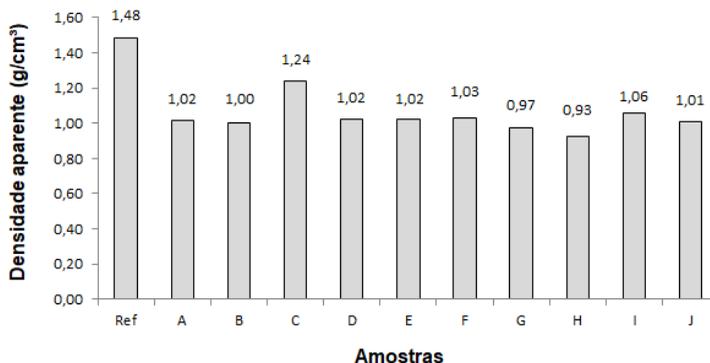


Fonte: Autor (2017).

4.3.2.3 Densidade aparente ou massa específica

Na sequência, a Figura 40 apresenta o resultado de densidade aparente ou massa específica.

Figura 40: Resultado do índice de densidade aparente ou massa específica.

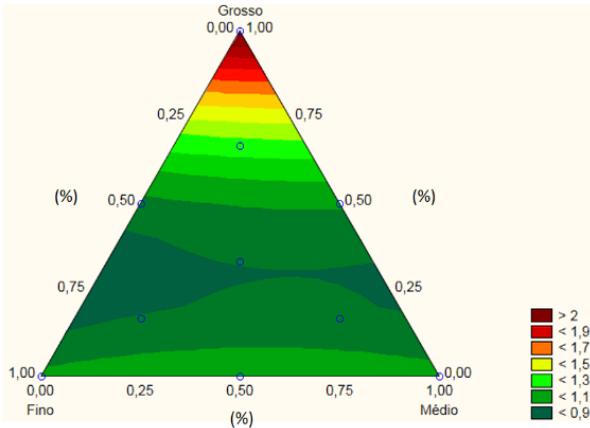


Fonte: Autor (2017).

Como esperado a amostra referência possui a densidade maior que as demais amostras, isso decorrente da ausência de poros gerados pelo agente porogênico. Os efeitos encontrados para densidade aparente ou massa específica observados na Figura 40 também podem ser observados no gráfico triangular de curvas de nível, o que indicam que, à medida que utilizamos o pó de Al com granulometria maior, sua densidade aumenta. Tal comportamento pode ser devido a formação de poros maiores, como visto na Figura 31, e com paredes entre os poros mais espessas. O gráfico apresentado na Figura 41 representa a curva de nível para o ensaio de densidade aparente.

Com os dados extraídos do Programa *Statistica* e admitindo nível de significância (p) de 0,05 e o coeficiente de determinação (R^2) de 0,90, o melhor modelo que se ajustou a esse ensaio foi o *Quadratic*. Para esse modelo o nível de significância apresentou o valor $p = 0,0216$. O valor para o coeficiente de determinação foi de $R^2 = 0,9217$ e o coeficiente de determinação R^2 ajustado = 0,8360.

Figura 41: Gráfico de curva de nível resultante do ensaio de densidade aparente.



Fonte: Autor (2017).

Esses resultados indicam que o modelo adotado é significativo. Observamos ainda na Equação 11 que as interações entre todos os fatores são significativas e não podem ser desprezadas. Contudo, com o auxílio do Programa *Statistica*, observamos que quando analisados os elementos separadamente tanto quanto em interação com os demais elementos, os valores são significativos com exceção da interação FM, que pode ser desprezada. A Figura 42 demonstra esse resultado, onde os valores em vermelho indicam que são significativos.

Equação 11 - Equação que rege o comportamento da densidade aparente.

$$DA = 1,030F + 1,046M + 2,160G + 0,232FM - 2,501FG - 2,347MG \quad (11)$$

Onde:

DA: densidade aparente (%);

F: granulometria fina do pó de alumínio (%);

M: granulometria média do pó de alumínio (%);

G: granulometria grossa do pó de alumínio (%);

Figura 42: Significância dos fatores e suas interações para densidade aparente.

Coeffs (recoded comps); Var.:Densidade Aparente; R-sqr=,9271; 3 Factor mixture design; Mixture total=1,, 10 Runs DV: Densidade Aparente; MS Residual=,0251509						
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(4)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
(A)Fino	1,03001	0,152950	6,73428	0,002533	0,60535	1,454666
(B)Médio	1,04637	0,152950	6,84127	0,002389	0,62171	1,471029
(C)Grosso	2,16001	0,152950	14,12232	0,000146	1,73535	2,584666
AB	0,23202	0,704926	0,32914	0,758561	-1,72517	2,189207
AC	-2,50071	0,704926	-3,54748	0,023853	-4,45789	-0,543520
BC	-2,34798	0,704926	-3,33082	0,029083	-4,30517	-0,390793

Fonte: Autor (2017).

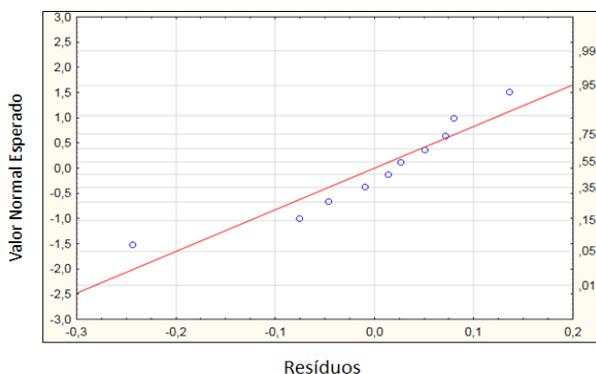
Desta forma reescrevemos a equação desprezando a interação não significativa por meio da equação 12.

Equação 12 - Equação que rege o comportamento de densidade aparente desprezando as interações não significativas.

$$DA = 1,030F + 1,046M + 2,160G - 2,501FG - 2,347MG \quad (12)$$

Para a propriedade de densidade aparente, temos uma tendência normal apresentada na Figura 44 através do gráfico *Normal Plot*, fornecido pelo Programa *Statistica*.

Figura 43: Gráfico de Probabilidade Normal sobre a propriedade de densidade aparente.



Fonte: Autor (2017).

4.3.2.4 Absorção de água por capilaridade

O resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade será apresentado na média das três medições para cada formulação. A Tabela 18 apresenta o resultado referente aos ensaios.

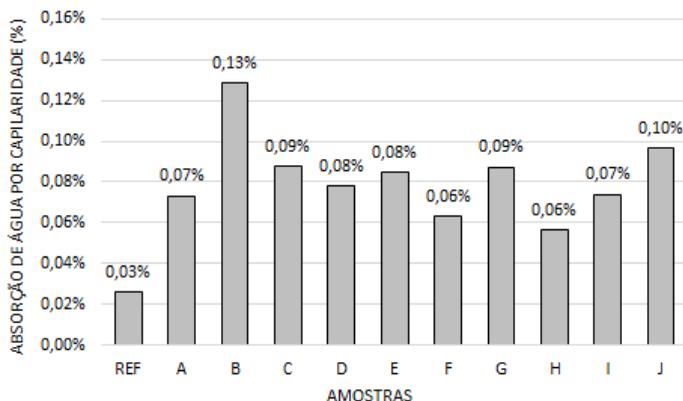
Tabela 18: Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade

Amostra	m_0 (g)	m_{10} (g)	m_{90} (g)	Ac_{10} (g/cm ²)	Ac_{90} (g/cm ²)
REF	445,28	447,13	449,91	0,12	0,29
A	264,22	267,32	269,06	0,19	0,30
B	252,68	257,87	259,90	0,32	0,45
C	334,78	339,48	342,07	0,29	0,46
D	283,17	286,70	289,03	0,22	0,37
E	320,16	324,50	326,85	0,27	0,42
F	314,30	317,47	320,94	0,20	0,42
G	310,10	314,44	317,56	0,27	0,47
H	296,76	299,44	301,49	0,17	0,30
I	314,64	318,37	321,23	0,23	0,41
J	310,61	315,41	320,39	0,30	0,61

Fonte: Autor (2017)

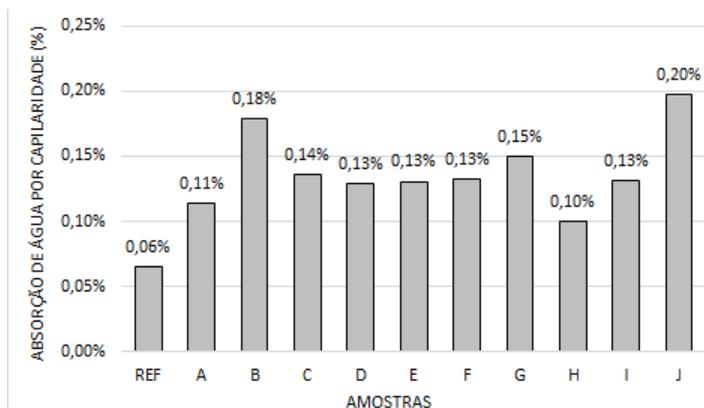
Para melhor analisar o quanto efetivamente houve de absorção de água sobre o CP seco a Figura 44 apresenta o percentual de absorção de água para cada formulação com o tempo de ensaio de 10 minutos e a Figura 45 o percentual de absorção de água para cada formulação com o tempo de ensaio de 90 minutos.

Figura 44: Absorção de água por amostra com 10 minutos de ensaio.



Fonte: Autor (2017).

Figura 45: Absorção de água por capilaridade com 90 minutos de ensaio.



Fonte: Autor (2017).

Não há um padrão de comportamento de absorção de água por capilaridade. O que se observa nos resultados é que após 90 minutos têm-se uma média de 0,13% de absorção sobre o CP seco com picos de absorção nas amostras B e J, a qual a amostra B tem na composição 100% do pó de Al com granulometria média enquanto o J possui 16,7% de pó de Al com granulometria fina e média, e com 66,7% de pó de Al com granulometria grossa.

Amostras durante o processo de absorção de água por capilaridade é apresentado na Figura 46.

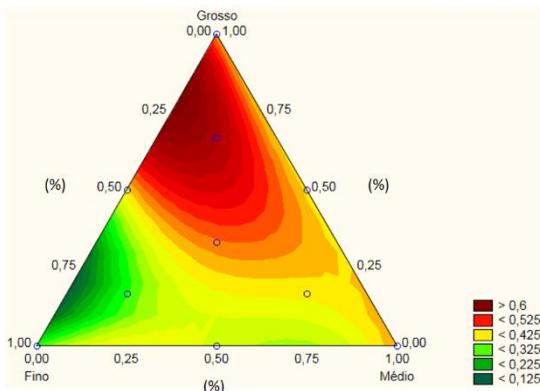
Figura 46: Amostras no processo de absorção de água.



Fonte: Autor (2017).

Os valores encontrados para absorção de água por capilaridade podem ser observados no gráfico triangular de curvas de nível. O gráfico apresentado na Figura 47 representa o ensaio de absorção de água por capilaridade com 90 minutos, ou seja, de imersão do CP no recipiente com água. Foram admitidos valores de nível de significância (p) de 0,05 e o coeficiente de determinação de R^2 de 0,90.

Figura 47: Gráfico de curva de nível do ensaio de absorção de água por capilaridade com 90 minutos.



Fonte: Autor (2017).

Pode-se observar que a tendência dos maiores valores de absorção de água está relacionada às misturas com menores valores de adição de pós com a granulometria grossa, somada com a interação de quantidades maiores de pós de granulometria fina e média. Esse fenômeno possivelmente ocorre, pois em amostras confeccionadas com pós de Al de menores granulometrias apresentaram poros menores e possivelmente intercalados, possibilitando assim a absorção de água.

Observando os resultados extraídos do Programa *Statistica*, o melhor modelo que se ajustou a esse ensaio foi o *Full Cubic*. Para esse modelo o nível de significância apresentou o valor $p = 0,062$. O valor para o coeficiente de determinação foi de $R^2 = 0,9992$ e o coeficiente de determinação R^2 ajustado = 0,9926. Esses resultados indicam que o modelo adotado é significativo. A Equação 13 indica que todas as interações entre todos os fatores são significativas e não podem ser desprezadas. Com o auxílio do Programa *Statistica*, observamos que quando analisados os fatores isoladamente todos são significativos, no entanto a interação FG(F-G) é a única significativa podendo ser

desprezadas as demais interações. A Figura 48 demonstra esse resultado, onde em vermelho indica que são significativos.

Figura 48: Significância dos fatores e suas interações para absorção de água por capilaridade com 90 minutos.

Coeffs (recoded comps); Var.:AC 90 Min V2; R-sqr=.9992; Adj.:.9						
3 Factor mixture design: Mixture total=1., 10 Runs						
DV: AC 90 Min V2; MS Residual=.00006						
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(1)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
(A)A	0,30263	0,007726	39,1683	0,016250	0,20445	0,400797
(B)B	0,45200	0,007726	58,5016	0,010881	0,35383	0,550172
(C)C	0,45658	0,007726	59,0948	0,010772	0,35841	0,554756
AB	-0,03991	0,037882	-1,0536	0,483374	-0,52125	0,441422
AC	0,15925	0,037882	4,2039	0,148672	-0,32208	0,640589
BC	-0,15283	0,037882	-4,0344	0,154681	-0,63417	0,328506
ABC	1,91449	0,248475	7,7049	0,082166	-1,24269	5,071663
AB(A-B)	0,67875	0,125846	5,3935	0,116710	-0,92028	2,277778
AC(A-C)	-2,57375	0,125846	-20,4515	0,031103	-4,17278	-0,974722

Fonte: Autor (2017).

Equação 13 - Equação que rege o comportamento da absorção de água por capilaridade com 90 minutos.

$$AC = 0,302F + 0,452M + 0,456G - 0,039FM + 0,159FG - 0,152MG + 1,914FMG + 0,678FM(F - M) - 2,573FG(F - G) \quad (13)$$

Onde:

AC: absorção por capilaridade (%);

F: granulometria fina do pó de alumínio (%);

M: granulometria média do pó de alumínio (%);

G: granulometria grossa do pó de alumínio (%);

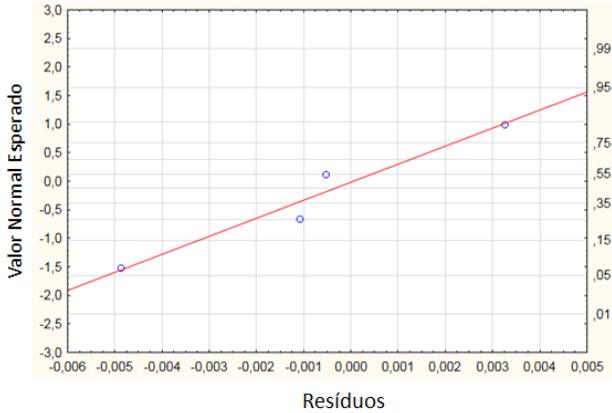
Desta forma reescrevemos a equação desprezando as interações não significativas na Equação 14:

Equação 14 - Equação que rege o comportamento de água por capilaridade com 90 minutos desprezando as interações não significativas.

$$AC = 0,302F + 0,452M + 0,456G - 2,573FG(F - G) \quad (14)$$

Para a propriedade de absorção de água por capilaridade com 90 minutos, temos uma tendência normal apresentada na Figura 49 através do gráfico *Normal Plot*, fornecido pelo Programa *Statistica*.

Figura 49: Gráfico de Probabilidade Normal sobre a propriedade de absorção de água por capilaridade com 90 minutos.

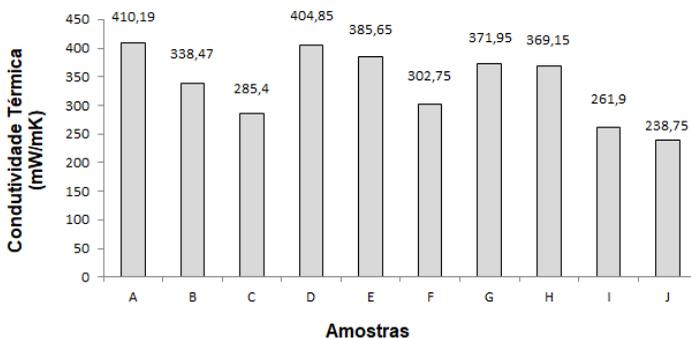


Fonte: Autor (2017).

4.3.2.5 Condutividade térmica

Os resultados de condutividade térmica em argamassas geopoliméricas contendo alumínio em pó, os quais são do Tipo 1401, 101 e 13, como agentes geradores de poros de granulometria e proporções diferentes são apresentadas na Figura 50.

Figura 50: Resultado do ensaio de condutividade térmica.



Fonte: Autor (2017).

A formulação da amostra J, com 16,7% de pó de alumínio com granulometria fina, 16,7% de pó de alumínio com granulometria média

e por fim 66,6% de adição do pó de alumínio com granulometria grossa, como geradores de poros, apresentou o menor valor de condutividade térmica (≈ 238 mW/mK). O valor de porosidade aberta para a amostra J foi de 27,57% o que representa uma matriz geopolimérica com grande volume de poros. 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.

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

Segundo Novais et. al. (2016a) que estudaram a produção de geopolímeros leves demonstrando que a influência do agente de formação de poros sobre a cinética de geopolímeros e a reologia das pastas tem sido bastante negligenciada. 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 0,08 W/mK) e densidade aparente (440 kg/m³).

Ainda neste contexto, Novais et.al, (2016b) estudou 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 reduz o volume de resíduos gerados contribuindo para uma construção sustentável. Os resultados 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 0,107 W/mK e uma densidade de 560 kg/m³, mostrando o potencial desses materiais em aplicações que requerem materiais leves e de baixa condutividade térmica.

O impacto do valor de densidade aparente é um fator determinante para o resultado de condutividade térmica, porém não houve uma correlação direta que apresenta esse resultado. Tudo indica

que a densidade está ligada a quantidade de poros e o seu tamanho, e por sua vez a condutividade térmica.

Os resultados não foram conclusivos, pois nesta pesquisa não foi levado em conta à relação da ligação entre os poros. Há indicação que caso não haja uma malha porosa interligada, criando dutos ou túneis a alterando assim o resultado da condutividade térmica. O que se sabe de fato é que quando os poros estão interligados há permissibilidade na matriz, ou seja, o fluído (nesta pesquisa a água), e o calor, neste caso a condutividade térmica ocorre com maior facilidade. Essa interação e ligação entre os poros estão associadas às diferentes dosagens de diferentes granulometrias do agente porogênico.

O modelo estatístico que apresentou o menor valor de p (valor de significância) foi o linear, porém com baixos valores de R^2 e R^2_{adj} . Os demais modelos estatísticos apresentam valores inconsistentes conforme Tabela 19.

Tabela 19: Valores de significância, coeficiente de determinação e coeficiente de determinação ajustado.

Ensaio	Linear			Special Cubic			Quadratic			Full Cubic		
	p	R ²	Radj	p	R ²	Radj	p	R ²	Radj	p	R ²	Radj
Condutividade térmica	0,04	0,60	0,49	0,51	0,69	0,06	0,37	0,65	0,21	0,87	0,74	0,00

Fonte: Autor (2017).

Diante dos valores apresentados, justifica-se que não temos um modelo estatístico que possa ser utilizado.

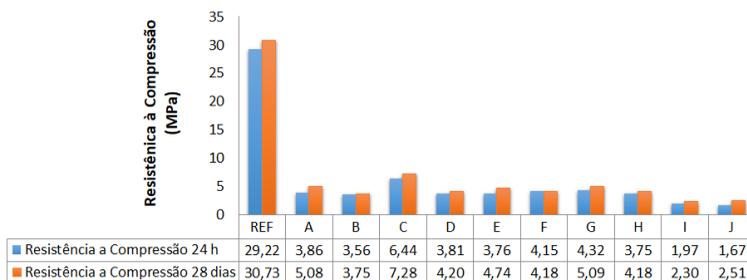
4.4 Caracterização das propriedades mecânicas

4.4.1 Resistência à Compressão e 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).

O resultado do ensaio de resistência à compressão realizado com 1 dia e 28 dias de cura é apresentado na Figura 51.

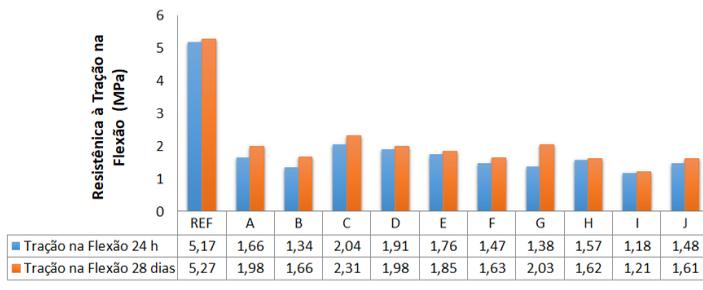
Figura 51: Ensaios de Resistência à compressão com 1 dia e 28 dias



Fonte: Autor (2017).

A Figura 52 apresenta o resultado dos ensaios de resistência à tração na flexão realizados com 1 dia e 28 dias.

Figura 52: Ensaios de resistência à tração na flexão com 1 dia e 28 dias.



Fonte: Autor (2107).

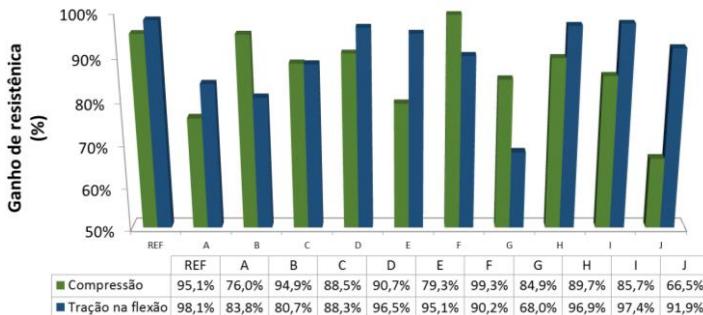
Os resultados mostrados nas Figuras 51 e 52 representam o que Pinto (2006) já indicou sobre matrizes geopoliméricas.

Devido às características físico-químicas, os geopolímeros garantem propriedades de destaque no estado fresco como: boa trabalhabilidade, boa coesão e acabamento superficial, o que resulta em um ganho rápido de resistência mecânica e dureza superficial. (PINTO, 2006).

Observa-se que, tanto no ensaio de resistência à compressão quanto no ensaio de resistência à tração na flexão, os resultados dos ensaios de 1 dia atingiram os valores próximos aos valores

correspondentes a 28 dias. A Figura 53 apresenta valores em percentual sobre o ensaio de 1 dia na comparação com o ensaio de 28 dias nos respectivos ensaios.

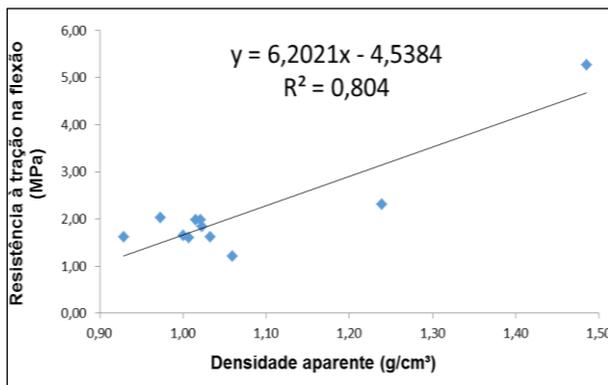
Figura 53: Ganho de resistência em 1 dia de cura comparado a 28 dias.



Fonte: Autor (2017).

Ao comparar-se os resultados das propriedades mecânicas com algumas propriedades físicas observa-se algumas respostas que estão correlacionadas. A Figura 54 relaciona a resistência à compressão com 28 dias e o resultado dos ensaios de densidade aparente.

Figura 54: Correlação resistência à compressão versus densidade aparente.



Fonte: Autor (2017).

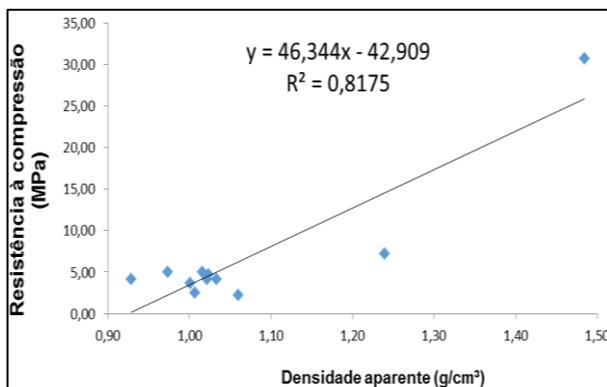
Ao analisar a Figura 54 percebe-se uma tendência de que a presença de poros gerado pela reação do Al diminuem a densidade da matriz geopolimérica diminuindo a resistência.

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, pastas, etc. A dependência da resistência da pasta de cimento hidratada em relação à sua porosidade e à distribuição das dimensões dos poros é fundamental.

Winslow & Liu (1990) observaram que, com pastas de mesma composição e mesmo grau de hidratação, a presença do agregado graúdo resulta em um aumento da porosidade. O mesmo efeito é verificado, embora em menor grau, na presença de agregados miúdo. A diferença entre a porosidade do concreto e a da pasta ou argamassa com a mesma relação água/cimento aumenta com o progresso da hidratação e adição de outros agentes porogênicos, sendo resultado da presença, no concreto e argamassa com agregado graúdo, de alguns poros maiores do que em argamassas com agregados miúdos e pastas.

A correlação entre a resistência à tração na flexão com a densidade aparente é apresentada na Figura 55.

Figura 55: Correlação resistência à tração na flexão versus densidade aparente.



Fonte: Autor (2017).

Da mesma forma, evidenciamos que a densidade aparente é uma propriedade importante e que influencia no ganho de resistência da matriz geopolimérica, onde maior a densidade maior será a resistência.

Quando analisamos os resultados dos ensaios no Programa *Statistica* apresentados na Tabela 20.

Tabela 20: Resultado dos modelos estatísticos nos ensaios de compressão e tração na flexão com 28 dias.

Ensaio	Linear			Special Cubic			Quadratic			Full Cubic		
	p	R ²	Radj	p	R ²	Radj	p	R ²	Radj	p	R ²	Radj
Compressão 28 dias	0,30	0,29	0,09	0,53	0,55	0,00	0,73	0,55	0,00	0,91	0,68	0,00
Tração na flexão 28 dias	0,33	0,28	0,07	0,53	0,55	0,00	0,75	0,55	0,00	0,96	0,58	0,00

Fonte: Autor (2017).

Percebe-se que o modelo experimental não se ajustou a nenhum dos modelos matemático estatístico, informados pelo Programa decorrente dos valores de p, R² e R²adj não serem condizentes com o esperado pelos parâmetros p = 0,05 e R² = 0,90 desejados.

5 CONCLUSÃO

Ao final desta pesquisa foi possível evidenciar visualmente que a quantidade de poros, a distribuição dos poros, o tamanho dos poros e a interligação entre os poros são fatores essenciais para o alcance dos objetivos. Foi proposto um método experimental de formulações que interagissem a matriz geopolimérica que consiste em uma proporção fixa de hidróxido de sódio, metacaulim, agregado e silicato de sódio variando em quantidade e granulometria do agente porogênico, neste caso o pó de alumínio atomizado.

O ensaio do índice de consistência apresentou resultados coerentes, indicando que a proporção de sólido e líquido está adequada ao proposto pela pesquisa e que as variações das medidas não são significativas diante das diferentes formulações.

Quanto às propriedades físicas, os resultados apontam que a quantidade de poros, ou seja, a porosidade aberta, assim como a densidade aparente são também indicadores que influenciam nos resultados de propriedades mecânicas e condutividade térmica.

Maiores valores de resistência à compressão e tração na flexão estão apresentados nas amostras C, onde a proporção do agente porogênico é 100% de granulométrica grossa. Isto se justifica por apresentar poros maiores e em volume menor. Outro importante fator é que a parede entre eles é mais espessa, proporcionando maiores valores de resistências.

Importante salientar que em média, o valor de resistência à compressão com 24 horas atingiu 86,4% dos valores encontrados com 28 dias. Já para valores de resistência a tração na compressão com 24 horas atingiu 89,7% dos valores encontrados com 28 dias. Esses resultados reforçam a tese de que matrizes geopoliméricas, em especial à base de metacaulim, utilizado nesta pesquisa como matéria-prima pozolânica, atingem altas resistências após as primeiras horas de cura.

Em relação à condutividade térmica, o menor valor encontrado está alinhado com a amostra J, resultando em 238,75 mW/mK, que foi confeccionada com 16,7% de pó de alumínio com a granulometria fina, 16,7% com o pó de alumínio com granulometria média e com 66,7% de pó de alumínio com a granulometria grossa. A combinação entre essa proporção de pó de alumínio permitiu menor condutividade térmica.

A proposta de uma matriz geopolimérica com a incorporação de pós de alumínio como agentes geradores de poros é promissora, porém é necessário que se pesquise sobre os fenômenos da interação destes

diferentes granulometrias sobre o efeito nas propriedades físicas e mecânicas desejadas.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para melhorar o entendimento e esclarecimento de alguns assuntos que não foram tratados nesta pesquisa ou se foram abordados de modo superficial, são sugeridos alguns de temas para trabalhos futuros:

- Estudar quimicamente a reação de oxidação dos pós de alumínio na geração de poros;
- Analisar os resultados de propriedades mecânicas em idades intermediárias as estudadas nesta pesquisa;
- Estudar a malha porosa da matriz geopolimérica com a intenção de desenvolver uma melhor interligação entre os poros;
- Substituir o material pozzolânico (Mk) natural por resíduos industriais.
- Estudar a substituição do pó de alumínio como agente gerador de poros por um material menos nobre.
- Avaliar as propriedades acústicas e vibracionais das matrizes geopoliméricas;
- Realizar um estudo econômico sobre a viabilidade do uso de pó de alumínio para confecção de matrizes geopoliméricas porosas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para Concreto - Especificações. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. **NBR 12.653**: Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 13.276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. 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 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 15.894**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2010.

ALCOA. Alcoa do Brasil. Disponível em: <<http://www.alcoa.com.br>>. Acesso em 15 de setembro de 2016.

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.

BUSCHLE & LEPPER. Produtos Químicos. Disponível em: <<http://www.buschle.com.br/produtos-quimicos>>. Acesso em 18 de outubro de 2017.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípio de Ciências e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Arte interativa, 2007. Cap. 26, p. 863-904.

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

COSTA E. B. da. et al., **Clínquer Portland com reduzido impacto Ambiental**, Ambiente Construído, v13, p. 75-86, 23 abril 2013. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em 17 jun. 2016.

DAVIDOVITS, J., **30 Years of Successes and Failures in Geopolymers Applications**. Market Trends and Potential Breakthroughs. Geopolymer 2002 Conference, Melbourne, Austrália, 2002.

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

DAVIDOVITS, J., **Geopolymer Chemistry and Applications**, Institut Geopolymere, Saint-Quentin, France, 584p., 2008.

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

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

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. Agregados para Construção Civil. In ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípio de Ciências e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Arte interativa, 2007. Cap. 16, p. 481-523.

IBRACON. **Materiais de Construção e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2 ed. São Paulo: Editor Geraldo Cechella Isaia, 2010. v. 2, cap. 51 e 52.

KHALE, D. AN D CHAUDHARY, R. **Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing its Development**: a review. Journal of Materials Science, vol. 42, p. 729 - 746, 2007.

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

MACCARINI, H. S., **Desenvolvimento de geopolímero a partir do uso de metacaulim**. Trabalho de Conclusão de Curso da Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville – SC 59p., 2015.

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.

METACAULIM DO BRASIL. Metacaulim HP ultra. Disponível em: <<http://www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html>> Acesso em 18 de outubro de 2017.

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

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

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.

NITA, C.; JOHN, V.M.; DIAS, C.M.R.; JUNIOR, H.S.; TAKEASHI, M.S. **Effect of metakaolin on the performance of pva and cellulose fibers reinforced cement**. 9th International Inorganic Bonded Wood and Fiber Vancouver, 2004.

NITA, C., **Utilização de Pozolanas em Compósitos de Cimento Reforçados com Fibra de Celulose e PVA**. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica de São Paulo – SP, 128p., 2006.

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

NOVAIS, R. M.; ASCENSÃO, G.; BURUBERRI, L.H.; SENFF, L.; LABRINCHA, J.A.; **Influence of blowing agent on the fresh- and hardened-state properties of lightweight geopolymers**, *Materials & Design*, Volume 108, 2016a, Pages 551-559.

NOVAIS, R. M.; ASCENSÃO, G.; BURUBERRI, L.H.; SENFF, L.; LABRINCHA, J.A.; **Porous biomass fly ash-based geopolymers with tailored thermal conductivity**, *Journal of Cleaner Production*, Volume 119, 2016b, Pages 99-107

PEREIRA, H. R. S.; **Proposta de Formulação de Argamassas para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos com Incorporação de Pó de Exaustão de Fundição**. Tese Doutorado. Universidade do Estado de Santa Catarina, Brasil. 2014.

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

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

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

ROCHA, G. G. **Caracterização Microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. 2005. 96 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.

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

SBRIGHI NETO, C. Agregados Naturais, Britados e Artificiais para Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Arte Interativa, 2011. Cap. 7, p. 233-260.

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

SANTOS, P. H. C.; SILVA FILHO, A. F., **Eflorescência**: causas e consequências. Salvador: [s.n.], 2008.

SILVA, P.D.; SAGOE - CRENSTIL,K.; SIRIVIVATNANOM,V. **Kinectis of Geopoly – merizat ion**: Role of Al_2O_3 and SiO_2 . Cement and Concrete Research, v.37 p. 512 – 518, 2007.

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

VASSALO, E. A. S.; **Obtenção de Geopolímero a Partir de Metacaulim Ativado**, 2013, 104 f, Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2013.

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.

WINSLOW, D; LIU D.; **The pore structure of paste in concrete**, *Cement and Concrete Research*, **20**, pp 227-84, 1990.