

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

BIANCA LOCH FORNASE

UTILIZAÇÃO DE CONCRETO RECICLADO PARA A PRODUÇÃO DE
GEOPOLÍMERO

Joinville

2017

BIANCA LOCH FORNASE

UTILIZAÇÃO DE CONCRETO RECICLADO PARA A PRODUÇÃO DE
GEOPOLÍMERO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia de Infraestrutura, da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Dr. Luciano Senff

Joinville

2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Alexandre e Andreza, pelo apoio que deram em toda minha caminhada acadêmica até chegar nesta última etapa.

Agradeço ao Prof. Dr. Luciano Senff pela orientação, compreensão e confiança, tornando possível o desenvolvimento deste trabalho.

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

Aos meus irmãos Thaynara, Shara, Vitor, Lucas e Lis que estiverem presentes em vários momentos auxiliando quando possível.

Aos amigos de Braço do Norte e aos amigos que fiz em Joinville por sempre estarem presentes, pelos conselhos, pelos momentos de apoio e descontração e por compreenderem, muitas vezes, minha ausência.

As minhas colegas do laboratório de Materiais de construção da Universidade Federal de Santa Catarina pela ajuda sempre que precisei.

Aos integrantes da banca por terem aceitado o convite para participarem.

RESUMO

Um dos mais importantes setores da economia, a indústria da construção civil, se caracteriza como um dos que mais consomem recursos naturais, desde a produção até a execução da obra, o que altera significativamente a qualidade de vida da sociedade e do meio ambiente. Desde a metade do século XX a comunidade científica vem desenvolvendo tecnologias verdes ou ambientalmente corretas para tentar diminuir os impactos causados. Um material que apresenta potencial ecológico e que já existe no mercado mundial há algumas décadas é o geopolímero. Visando isto, este trabalho tem como objetivo a produção de uma argamassa geopolimérica. Os geopolímeros são produzidos a partir da polimerização de matérias primas ricas em aluminossilicatos na forma amorfa ou semi cristalina, ativadas quimicamente por uma solução alcalina. Nesta pesquisa utilizou-se como fonte de aluminossilicatos o metacaulim, quanto à solução ativadora, o hidróxido de sódio e o silicato, bem como o concreto reciclado, que tem como objetivo principal a reutilização do concreto que seriam descartados no meio ambiente e a diminuição da quantidade de areia na mistura. Para a produção das argamassas geopoliméricas foram realizados vários testes, até obter a formulação correta das frações de concreto reciclado, metacaulim e hidróxido de sódio. Encontrada a formulação correta foram feitos ensaios no estado fresco e endurecido. A formulação que obteve melhores resultados foi a que não utilizou resíduo, a resistência à flexão e a compressão desta foi maior que as demais formulações. Em contrapartida, formulação que utilizou o resíduo obteve o pior desempenho, registrou os valores mais baixos, porém aceitável em termos de resistência mecânica, de resistência à flexão e a compressão. Com isso concluiu-se, partir dos resultados que a argamassa geopolimérica possui 4,40 MPa de resistência à flexão e 20,16 MPa de resistência à compressão e, que esta pode ser utilizada para a fabricação de argamassas mais ecologicamente corretas.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Geopolímeros. Metacaulim. Concreto reciclado. Argamassas geopoliméricas.

ABSTRACT

One of the most important economy fields, the construction industry, is characterized as one of the biggest natural resources consumer, since the production until the execution of the work, which significantly changes the life quality of the society and the environment. Since the mid-twentieth century, the scientific community has been developing corrects green or environmentally technologies to attempt reducing the impacts caused. A material that has ecological potential and that already exists in the world market for some decades is the geopolymer. According to that, this work has the objective of producing a geopolymer mortar. Geopolymers are produced from the polymerization of aluminosilicates rich in amorphous or semi crystalline form, chemically activated by an alkaline solution. In this research, metakaoline was used as an aluminosilicate source, and sodium hydroxide and silicate were used as alkaline activators, as well as recycled concrete, whose main objective is the reuse of the concrete that would be disposed in the environment and the reduction of Amount of sand in the mixture. For the production of the geopolymeric mortars, several tests were carried out until the correct formulation of the fractions of recycled concrete, metakaolin, sand, silicate and sodium hydroxide were obtained. Once the correct formulation was found, tests had been made on fresh and hardened state. The formulation that obtained the best results was the one that did not use waste, the flexural strength and the compression of this was greater than the other formulations. In contrast, the formulation that used the waste was the one that obtained the lowest performance of flexural strength and compression. It was concluded from the results obtained in the laboratory that the geopolymer mortar that used 100% recycled concrete in substitution of the sand has 4.40 MPa of flexural strength and 20.16 MPa of compressive strength and that is possible to be used for the manufacture of more ecologically correct mortars.

Keywords: Sustainability. Geopolymers. Metakaolin. Recycled concrete. Geopolymer mortars.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Objetivos	11
1.1.1. Objetivo geral	11
1.1.2. Objetivos específicos.....	11
2. GEOPOLÍMEROS	13
2.1. Histórico	14
2.2. principais matérias primas da argamassa geopolimérica	15
2.2.1. Caulim e metacaulim	15
2.2.2. Ativadores.....	15
2.2.3. Blocos de concreto reciclado	16
2.3. Vantagens do geopolímero	17
2.4. Aplicação na construção civil	18
2.5. Impactos ambientais causados na produção do concreto geopolimérico	21
3. MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1. Materiais	24
3.2 Metodologia experimental	29
3.2.1. Produção da argamassa.....	30
3.2.2. Ensaio no estado fresco	31
3.2.3. Ensaio no estado endurecido	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1. Trabalhabilidade	35

4.2. Densidade aparente	35
4.3. Porosidade aberta	36
4.4. Absorção de água	37
4.5. Resistência a flexão e a compressão	39
5. CONCLUSÃO	41
5.1. Sugestões para trabalhos futuros	41
REFERÊNCIAS	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática dos polissialatos	13
Figura 2 – Artefatos geopoliméricos para construção civil.....	19
Figura 3 – Aeroporto Brisbane West Wellcamp (Austrália).....	20
Figura 4 – Quadro geral de aplicações dos geopolímeros.....	20
Figura 5 – Ensaio realizados para cada formulação.....	24
Figura 6 – Distribuição do tamanho dos grãos e difração de raio X do metacaulim.....	25
Figura 7 – Metacaulim utilizado para a produção da argamassa.....	25
Figura 8 – Areia utilizada para a produção das argamassas geopoliméricas.....	26
Figura 9 – Granulometria da areia.....	27
Figura 10 – Blocos de concreto utilizados na produção da argamassa	27
Figura 11 – Granulometria do concreto reciclado	28
Figura 12 – Peneiras utilizadas pra fazer a granulometria do concreto reciclado	28
Figura 13 – Hidróxido de sódio e solução ativadora utilizada	29
Figura 14 – Equipamentos utilizados na preparação da argamassa geopolimérica.....	31
Figura 15 - Mesa de adensamento para realizar o ensaio no estado fresco	31
Figura 16 – Equipamentos utilizados no ensaio endurecido	32
Figura 17 – Corpos de provas produzidos após 28 dias de cura	35
Figura 18 – Densidade aparente da argamassa geopolimérica com 28 dias de cura.....	36
Figura 19 – Porosidade aberta da argamassa geopolimérica com 28 dias de cura.....	37
Figura 20 – Absorção de água da argamassa geopolimérica com 28 dias de cura.....	38
Figura 21 – Relação entre a porosidade aberta e a densidade aparente.....	39
Figura 22 – Relação entre a porosidade aberta e a absorção de água	39
Figura 23 – Resistência a compressão da argamassa geopolimérica.....	40
Figura 24 – Resistência a flexão da argamassa geopolimérica	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CO_2 – Dióxido de carbono (gás carbônico)

NaOH – Hidróxido de sódio

Si – Silício

Al – Alumínio

SiO_2 – Óxido de silício

Al_2O_3 – Óxido de alumínio

MPa – Megapascal

$^{\circ}\text{C}$ – Graus Celsius

W/m. k – Watt por metro por Kelvin

mm – Milímetros

g – Gramas

S/L – Razão sólido e líquido

S – Segundos

m^2 – Metros quadrados

KOH – Hidróxido de potássio

NBR – Norma Brasileira

μm – Micrometro

D.A – Densidade aparente

A.A – Absorção de água

P.A – Porosidade aberta

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Composição química do metacaulim, determinada por FRX.....	24
TABELA 2 – Composição do hidróxido de sódio	26
TABELA 3 – Características do silicato	29
TABELA 4 – Formulação utilizada para produção da amostra de referência.....	30
TABELA 5 – Composição utilizada para cada formulação	34
TABELA 6 – Valores médios de índices físicos para cada formulação e seus respectivos desvios padrões.....	38

1. INTRODUÇÃO

Há algumas décadas, se via o meio ambiente como um reservatório de matérias primas onde se podia facilmente extraí-las e depositar rejeitos sem fiscalização ou consciência ambiental. A consequência dessa demanda de matéria prima por parte do mundo industrializado acarretou em sérios impactos ambientais. Com o intuito de minimizar os efeitos negativos causados pela construção civil na natureza, o homem vem buscando diversos tipos de materiais que possam minimizar a emissão de poluentes.

O concreto é o segundo material mais consumido no mundo, sendo superado somente pela água (RUBENSTEIN, 2012) e este consumo só tende a crescer. Além disso, corresponde a uma porcentagem significativa das emissões totais de gás carbônico (CO₂) devido ao cimento Portland, cuja base é o clínquer, resultante da mistura de calcário e argila. De acordo com Davidovits (2013), a produção de 1 tonelada de clínquer gera 0,95 toneladas de dióxido de carbono, o que faz esse material ser altamente poluente. As emissões anuais de CO₂ oriundas da produção de cimento chegam a quase 3 bilhões de toneladas por ano em todo o mundo. Outro inconveniente relacionado ao uso de cimento se relaciona ao concreto produzido, cuja vida útil está associada ao tipo de aplicação (TORGAL et al., 2005).

Em alternativa ao cimento Portland comum, os materiais geopoliméricos apresentam características similares aos materiais à base de cimento, são produtos estudados atualmente e atrativos em termos de mercado, pois possuem características favoráveis para substituir os materiais à base de cimento. O termo geopolímero refere-se a um produto originado de uma reação específica entre aluminossilicato sólido e uma solução aquosa de um silicato ou hidróxido alcalino (DAVIDOVITS, 1994). O cimento geopolimérico foi patentado nos Estados Unidos em 1976 por Joseph Davidovits.

Os geopolímeros são obtidos a partir de materiais ricos em sílica e alumina em solução alcalina e apresenta características similares aos materiais a base de cimento. Suas principais características são: rápido endurecimento devido ao processo de geopolimerização, boa resistência mecânica, ao fogo e a substâncias ácidas, bem como, baixa condutividade térmica (TURNER; COLLINS, 2013; LABRINCHA et al., 2013).

Estudos iniciados nas décadas de 1940-50 pelos pesquisadores ucranianos Glukhovsky e Krivenko deram início a pesquisas que seguem até hoje em torno da substituição do cimento Portland por materiais obtidos a partir da ativação alcalina de aluminossilicatos (KRIVENKO, 2008). Já na década de 90, o pesquisador francês Joseph Davidovits começou a publicar seus primeiros resultados com ativação de diferentes tipos aluminossilicatos em uma série de produtos que denominou de geopolímeros (DAVIDOVITS, 1994).

“Os geopolímeros já possuem aplicação prática em diversas partes do mundo, sendo empregados como dormentes de ferrovias, blocos refratários, painéis pré-fabricados, reparações de rodovias e em obras de infraestrutura de pavimentação.” (GLASBY et al., 2015). Podem ser empregados ainda como cimento para ambientes agressivos, estabilização de solos contaminados e materiais para aplicações balísticas.

As construções executadas a partir do concreto geopolimérico ao invés do concreto tradicional requerem estudos mais detalhados em relação às propriedades físicas e mecânicas, em particular quando desenvolvido a partir do estudo reológico no estado fresco.

Diante disso, com base nas vantagens e na vasta aplicação de materiais geopoliméricos, esta pesquisa concentra-se em estudar alguns parâmetros físicos e mecânicos de uma argamassa geopolimérica que foi produzida a partir de concreto reciclado e ativador alcalino de hidróxido de sódio. O concreto reciclado são fragmentos de blocos, que não seriam mais utilizados, fornecidos pela empresa Enville, situada em Joinville.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Produzir e avaliar a influência do uso de concreto reciclado em uma argamassa geopolimérica até os 28 dias de cura.

1.1.2. Objetivos Específicos

Para conseguir alcançar o objetivo geral são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a influência de diversos teores de concreto reciclado na trabalhabilidade das argamassas.
- Produzir corpos de prova para avaliar as propriedades físicas (absorção de água, densidade aparente, porosidade aberta) até os 28 dias de cura.
- Avaliar as propriedades mecânicas (resistência à compressão e a flexão) com 28 dias de cura.

O trabalho foi dividido em cinco capítulos. O capítulo um referiu-se a introdução no qual se apresentou à problemática, a justificativa, a metodologia e os objetivos gerais e específicos do trabalho. O segundo contém a fundamentação teórica necessária para o entendimento do assunto abordado. No terceiro é descrita a metodologia abordada que se refere aos materiais e métodos laboratoriais utilizados para a produção do geopolímero. A análise e resultados são apresentados no quarto capítulo e, por fim, no quinto são apresentadas as considerações finais da pesquisa.

2. GEOPOLÍMEROS

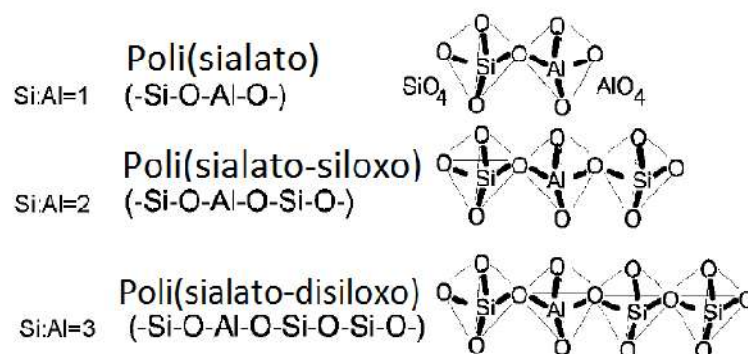
O termo geopolímero refere-se a um produto originado de uma reação específica entre aluminossilicato sólido e uma solução aquosa de um silicato ou hidróxido alcalino (DAVIDOVITS, 1994). Esse termo é utilizado também para representar polímeros inorgânicos cuja produção se dá a partir da polimerização de matérias primas naturais de origem geológica que contenham aluminossilicatos.

Segundo Ramos (2010), a estrutura dos geopolímeros é análoga à de polímeros orgânicos no que se refere à conectividade de estruturas químicas. Eles são formados por tetraedros de SiO_4 e AlO_4 ligados alternadamente pelo compartilhamento de átomos de oxigênio.

Outra terminologia adotada por Davidovits, em 1976, para designar os geopolímeros é a de polissialatos, abreviatura de poli-silico-aluminatos, os quais representam uma cadeia molecular de estrutura amorfa à semicristalina constituída de silício, alumínio e oxigênio. A estrutura dos polissialatos representa polímeros naturais resultantes da reação de geo-síntese através de um arranjo tridimensional no qual os átomos de silício (Si) alternam-se com os de alumínio (Al) (SILVA, 2000 *apud* VASSALO, 2013).

A representação desses arranjos tridimensionais é formada de acordo com a razão Si/Al, sendo classificado em três tipos: Poli(sialate) com razão Si/Al=1, Poli(sialate-siloxo) com razão Si/Al=2, e Poli(sialate-disiloxo) com razão Si/Al=3, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Representação esquemática da estrutura cristalina e ligações dos polissialatos.



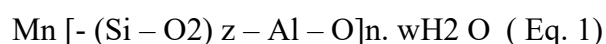
Fonte: Davidovits (2002).

Segundo Davidovits (2008) os geopolímeros podem ser considerados um novo cimento. Este material possui propriedades físicas e químicas semelhantes ao cimento convencional, porém é mais bem avaliado quando analisado do ponto de vista ecológico.

2.1. Histórico

Estudos iniciados nas décadas de 1940-50 pelos pesquisadores ucranianos Lukhovsky e Krivenko deram início a pesquisas que seguem até hoje em torno da substituição do cimento Portland por materiais obtidos a partir da ativação alcalina de aluminossilicatos (KRIVENKO, 2008).

Entre 1970 e 1973, após uma série de incêndios catastróficos na França, Joseph Davidovits iniciou suas pesquisas para desenvolver novos materiais poliméricos inorgânicos resistentes ao calor e não inflamáveis. O termo geopolímero foi criado por ele logo em seguida, em 1978, e representa polímeros minerais resultantes da geoquímica, processo para a produção de rocha artificial a temperaturas inferiores a 100°C com o objetivo de obter características naturais como dureza, durabilidade e estabilidade térmica (DAVIDOVITS, 1996). O processo de fabricação envolve a geopolimerização de calcário com hidróxido de sódio, produzidos in situ pela mistura de cal, carbonato de sódio e água. Sua fórmula empírica está descrita na Equação 1.



Onde M é o elemento alcalino, z é 1,2 ou 3, n é o grau de polimerização e o traço significa uma ligação.

Davidovits acreditava que as pirâmides do Egito foram erguidas há 4.500 anos e que foram construídas por material geopolimérico. Isso explica a grande resistência dos materiais geopoliméricos.

No ano de 1983, a empresa americana Lone Star's Industries iniciou, juntamente com a empresa européia Geopolymer Institute, o desenvolvimento de ligantes geopoliméricos e cimentos compostos por geopolímeros e água.

Um novo cimento polimérico inorgânico, de alta resistência e curável a temperatura ambiente, foi desenvolvido a partir desses estudos pelas variações molares entre seus principais óxidos oxidantes.

2.2. Principais matérias primas da argamassa geopolimérica

Para a produção de geopolímeros precisa-se de uma fonte de aluminossilicatos e uma fonte aquosa de silicato ou hidróxido alcalino. Em teoria, qualquer material que contenha alumínio e sílica tem potencial para ser fonte de aluminossilicato no processo de geopolimerização. A fonte de aluminossilicato pode ser obtida diretamente da natureza, como é o caso do mineral caulim, ou podem ser utilizados resíduos agrícolas e/ou industriais como blocos de concreto. As ativações alcalinas mais utilizadas no mercado para a produção de geopolímeros são o hidróxido de sódio ou de potássio.

Com o uso adequado dessas matérias primas se produz o geopolímero. Além do uso adequado das matérias primas a composição química da mistura, a frequência de rotação e as condições de cura afetam significativamente no resultado final.

2.2.1. Caulim e Metacaulim

A metacaulinita é resultante do processo de calcinação da caulinita, um mineral cristalino de origem natural de granulometria fina, geralmente de cor branca e boa inércia química. A produção do metacaulim inicia-se com a avaliação de reservas e depósitos de argilas caulínicas, etapa seguida da lavagem do material nas minas. Depois de ser lavado, o caulim resultante do desmonte é coletado por gravidade e bombeado para a usina de beneficiamento, onde se deve garantir uma composição química favorável a sua aplicação (NETTO, 2006). O termo “meta” significa mudança e, na química, é empregado para denotar um composto “menos hidratado”, decorrente da desidroxilação realizada (ROCHA, 2005).

Em seus estudos, Davidovits calcinou a caulinita entre 750° a 800°C, por um período de 6 horas. Entretanto, para muitos autores, a temperatura ideal de calcinação para a geração do metacaulim está entre 700° a 800°C, dependendo da pureza, composição química e mineralógica e cristalinidade das argilas.

O metacaulim possui em sua composição elementos essenciais para produção de geopolímeros, entre eles SiO₂, cerca de 52%, e Al₂O₃ 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).

2.2.2. Ativadores

A microestrutura e as propriedades dos geopolímeros dependem em grande parte da composição química da matéria prima e dos ativadores, bem como da proporção adequada entre sílica e alumina e entre os ativadores utilizados. A geopolimerização é um processo que ocorre entre aluminossilicatos e um ativador químico em meio aquoso, em condições altamente alcalinas.

Segundo Wallah (2006), os geopolímeros são formados por materiais cimentícios suplementares e os líquidos alcalinos. Estes líquidos podem ser à base de sódio ou potássio. Dois exemplos são: hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH).

Na maioria das pesquisas o hidróxido de sódio é mais utilizado. De fato, o primeiro tem um custo de produção bem mais baixo, o que garante a sua escolha. O NaOH é preparado principalmente por métodos eletrolíticos, usando-se solução aquosa de cloreto de sódio (SILVA, 2012). O tipo de material utilizado como ativador químico e a quantidade de íons hidroxila disponíveis na solução após o contato com a água influenciam o desenvolvimento da resistência do geopolímero produzido, concluindo-se que o aumento da concentração molar resulta em maior resistência (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2005 apud CESARI, 2015).

Um aspecto importante que deve ser analisado na solução ativadora é a sua concentração molar. Para Konmitsas et al., (2007) o excesso de ativador pode formar carbonato de sódio em contato com o ar, causando eflorescência na matriz geopolimérica. Através de estudos desenvolvidos pelos autores citados no item 2.1 verificou-se que a molaridade ideal estaria entre 8 e 10 mols.

2.2.3. Blocos de concreto reciclado

Outra matéria prima utilizada no presente trabalho de pesquisa é o concreto, material composto, constituído basicamente por cimento, água, agregado graúdo (pedra ou brita), agregado miúdo (areia) e ar. Ele é o material estrutural de maior uso na atualidade. Ao contrário da madeira e do aço comum, a capacidade do concreto de resistir à ação da água faz dele um material ideal para estruturas destinadas a controlar, estocar e transportar água. De fato, uma das primeiras aplicações conhecidas do concreto consistiu em aquedutos e muros de contenção de água, construídos pelos romanos. (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

As razões para o uso tão difundido do concreto são: a facilidade com que elementos estruturais de concreto podem ser executados, numa variedade de formas e tamanhos; mais barato e mais facilmente disponível no canteiro de obra (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

De acordo com a norma NBR 6136 o bloco se define como um elemento de alvenaria cuja área líquida é igual ou inferior a 75% da área bruta. Um fator importante que deve ser levantado é o potencial da utilização do bloco rígido de concreto e a análise do benefício do uso desse material em substituição de outro elemento de alvenaria. Dentre as vantagens e desvantagens de se utilizar o bloco de concreto comparado a outros elementos de alvenaria pode-se citar (ABIBC, 2007; VFAZITTO, 2007):

Vantagens:

- Medidas mais uniformes;
- Economia de material, já que a parede com blocos de concreto é mais plana que a do bloco cerâmico;
- Dispensa o chapisco e o revestimento de argamassa em alguns casos;
- Possibilidade de se pintar diretamente sobre o bloco ou deixá-lo aparente;
- Redução de tempo da obra;
- Economia de 15 a 20% do valor da obra;
- Utiliza-se menos blocos por m², cerca de 12,5 blocos por m² ante 25 tijolos.

Desvantagens:

- Menor conforto térmico;
- Necessita de mão-de-obra especializada;
- Contribui com o aumento do peso da estrutura;
- Maior absorção de água.

2.3. Vantagens do geopolímero

Segundo Davidovits (1994), o cimento geopolimérico com cura à temperatura ambiente pode adquirir resistência à compressão de 20 MPa em 4 h a 20 °C. Dependendo ainda das condições de síntese e cura, esses materiais podem atingir valores de resistência à compressão de 70 a 100 MPa (TEIXEIRA PINTO, 2004), o qual se assemelha muito ao cimento Portland. Ainda, dentre as propriedades do geopolímero, pode-se citar:

- Baixos valores de permeabilidade, que favorecem sua aplicação na imobilização de resíduos tóxicos e radioativos (GIANNOPOULOU; PANIAS, 2007);
- Resistência às altas temperaturas, o que permite desenvolvimento de estruturas mais resistentes à ação do fogo (KONG; SANJAYAN, 2010);
- Alta durabilidade química (BAKHAREV, 2005).

Vantagens da substituição dos cimentos convencionais por geopolímeros foram citadas por Cunha (2013). Destacam-se as seguintes:

- Matéria-prima abundante, é possível produzir geopolímero utilizando pozolanas ou através de produtos cuja composição contenha quantidades de sílica e alumina, como uma grande quantidade de resíduos industriais;
- Economia de energia e sustentabilidade ambiental, uma vez que a produção de geopolímeros não requer grandes quantidades de energia. A energia necessária é basicamente a energia para chegar a 600°C. As emissões de CO₂ são insignificantes quando comparadas ao cimento Portland;
- A produção é simples: basta uma mistura da pozolana com um ativador alcalino;
- Rápido ganho de resistência: Estudos indicam que os geopolímeros adquirem cerca de 70% da resistência à compressão em 4 horas;
- Excelentes propriedades de durabilidade: possuem uma resistência a ataques de ácidos significativamente superiores à resistência de betões convencionais;
- Elevada resistência ao fogo: conseguem resistir a temperaturas de 1000°C a 1200°C sem perder características funcionais;
- Baixa condutividade térmica: a sua condutividade térmica varia entre valores de 0,24 a 0,3 W/m.K;
- Elevada resistência a ciclos de congelamento – descongelamento;
- Possuem excelente comportamento ao ataque de sulfatos.

2.4. Aplicação na construção civil

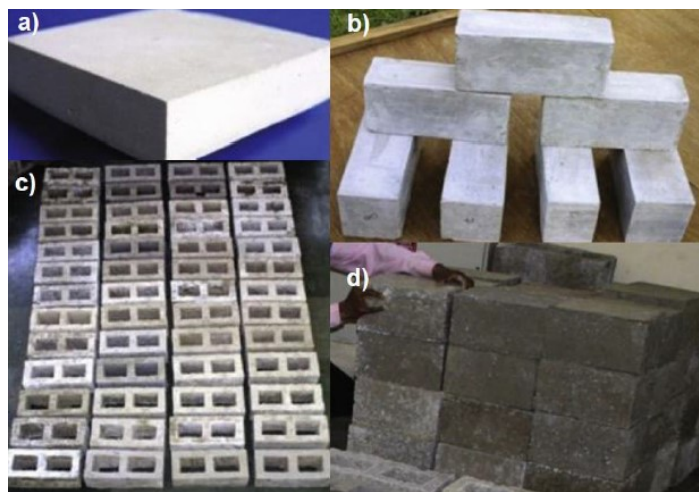
Em razão das inúmeras vantagens da substituição do cimento convencional pelo geopolímero a argamassa geopolimérica possui um grande potencial de aplicações na construção civil. Para Davidovits (2002), essas aplicações incluem desde materiais de construção e pavimentação, materiais resistentes ao fogo, telhas de cerâmica, materiais refratários e materiais de fundição, até materiais compósitos, sistemas de resinas de alta tecnologia, além de servirem de barreira de contenção para resíduos tóxicos e radioativos.

Este mesmo autor afirma que os geopolímeros podem ser utilizados tanto em países industrializados em que trabalha com o encapsulamento de resíduos tóxicos e radioativos, quanto em países que ainda estão em desenvolvimento que enfatizam o uso de geopolímeros para a produção de cimento.

Na figura 2 têm-se diversos blocos produzidos com matriz geopolimérica. Um exemplo de aplicação deste material foi à construção do aeroporto de Brisbane, apresentado na figura 3, onde foram consumidas 100 mil toneladas de concreto geopolimérico.

Davidovits através de seus estudos conseguiu resumir os possíveis tipos de materiais que podem ser formados em função da razão Si/Al e do campo de aplicação, esses materiais e suas aplicações encontram-se resumidos na figura 4. As relações Si/Al baixas favorecem a obtenção de altas resistências mecânicas. É o campo dos ligantes, dos materiais de construção ou do encapsulamento de produtos tóxicos. À medida que aumenta a relação Si/Al se obtém materiais com caráter mais poliméricos.

Figura 2 – Artefatos geopoliméricos para construção civil: a) espuma geopolimérica b) tijolo maciço c) blocos vazados d) blocos maciços.



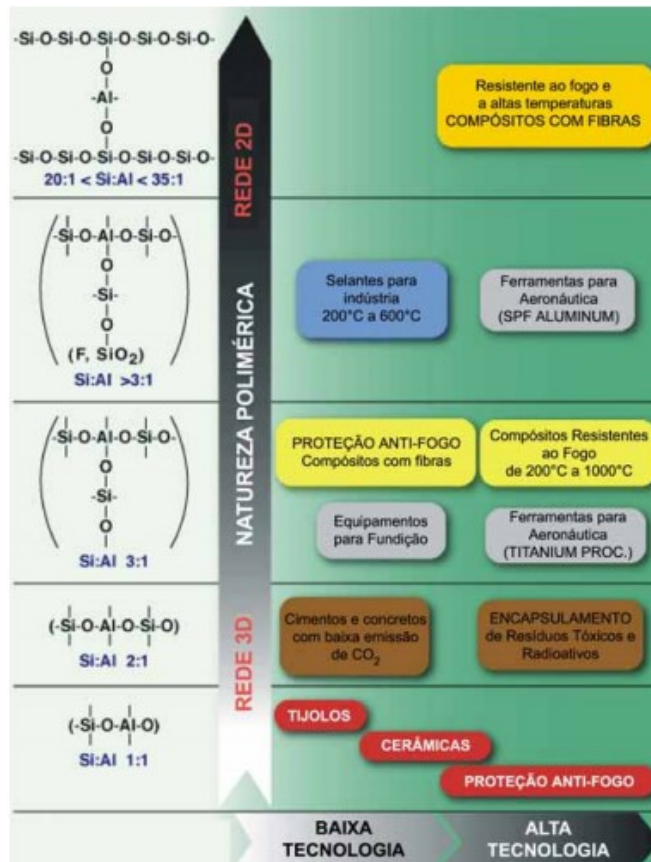
Fonte: SING et al., 2015

Figura 3 – Aeroporto Brisbane West Wellcamp (Austrália).



Fonte: The Chronicle 29 Sept. 2014

Figura 4 – Quadro geral de aplicações dos geopolímeros.



Fonte: Fonte: www.geopolymer.org, 2016.

De uma forma resumida pode-se dizer que este material tem duas grandes linhas de aplicação:

1. Uma dirigida à obtenção de materiais de baixo custo, para utilização em grandes quantidades, como materiais de construção.
2. Uma segunda linha dirigida à obtenção de materiais mais sofisticados, ainda que mais caros, em que a razão atômica referida pode alcançar valores até 35, podendo inclusive admitir-se a incorporação de fibras de vários tipos (amianto, carbono, vidro, etc.). Estes materiais poderão, de acordo com Davidovits, substituir com vantagem os plásticos, certos metais e mesmo os produtos cerâmicos. Nesta linha de atuação, o material básico é o metacaulim, que sofrerá as correções do teor em sílica que cada tipo de material pode implicar.

Vários pesquisadores vêm destacando as boas propriedades dos geopolímeros, evidenciando que esse material tem um grande potencial de aplicação nos campos da sociedade civil, podendo ser utilizados em pontes, pavimentação, tratamento de resíduos, hidráulica, engenharia subterrânea, etc. (DAVIDOVITS, 1988; YUNSHENG, 2004).

2.5. Impactos ambientais causados na produção do concreto geopolimérico

Os geopolímeros surgiram como alternativa ao cimento Portland para diminuição de CO_2 , por reduzir o consumo de clínquer na produção, mas principalmente por permitir o emprego de resíduos industriais não alocados.

O geopolímero do presente trabalho de pesquisa é produzido através de uma reação exotérmica, que resulta em um material aglomerante. As emissões de CO_2 no processo produtivo do concreto geopolimérico não estão relacionadas ao ligante em si, mas sim à obtenção de suas matérias-primas: ocorrem emissões no processo produtivo do metacaulim e do silicato de sódio; em ambos o CO_2 é proveniente da queima de combustíveis fósseis para fornecimento de calor. Sendo a matéria prima mais significativa nas emissões o silicato de sódio.

Existem 4 processos de produção do silicato porém, o mais utilizado atualmente em escala industrial, envolve a área de SiO_2 e carbonato alcalino, o resultado final é o silicato alcalino e a emissão de CO_2 , o processo ocorre entre 1400 à 1500°C. O segundo, apesar de não usado, foi baseado SiO_2 e sulfato de sódio com adição de carbono. O terceiro e o quarto são através do método hidrotérmico, que é realizado em autoclave onde o SiO_2 reagindo com

o hidróxido alcalino, e atualmente se tem vários laboratórios que fabricam o silicato de sódio através da reação da sílica ativa com NaOH ou KOH.

Existem dois processos de fabricação das soluções de polissiloxonato (silicato) solúveis: o processo em forno e o processo hidrotérmico. No processo em forno, a areia e o carbonato de sódio são misturados, colocados no forno e fundidos. Essa mistura é enviada para outra companhia que dissolve o material e misturam em água ou processam reaglomerando para produzir o silicato em pó. O silicato é então dissolvido em autoclave e misturado com outros ingredientes ou com outros álcalis para produzir o silicato de sódio disponível comercialmente. No processo hidrotérmico, usa-se areia e a soda cáustica em autoclave.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

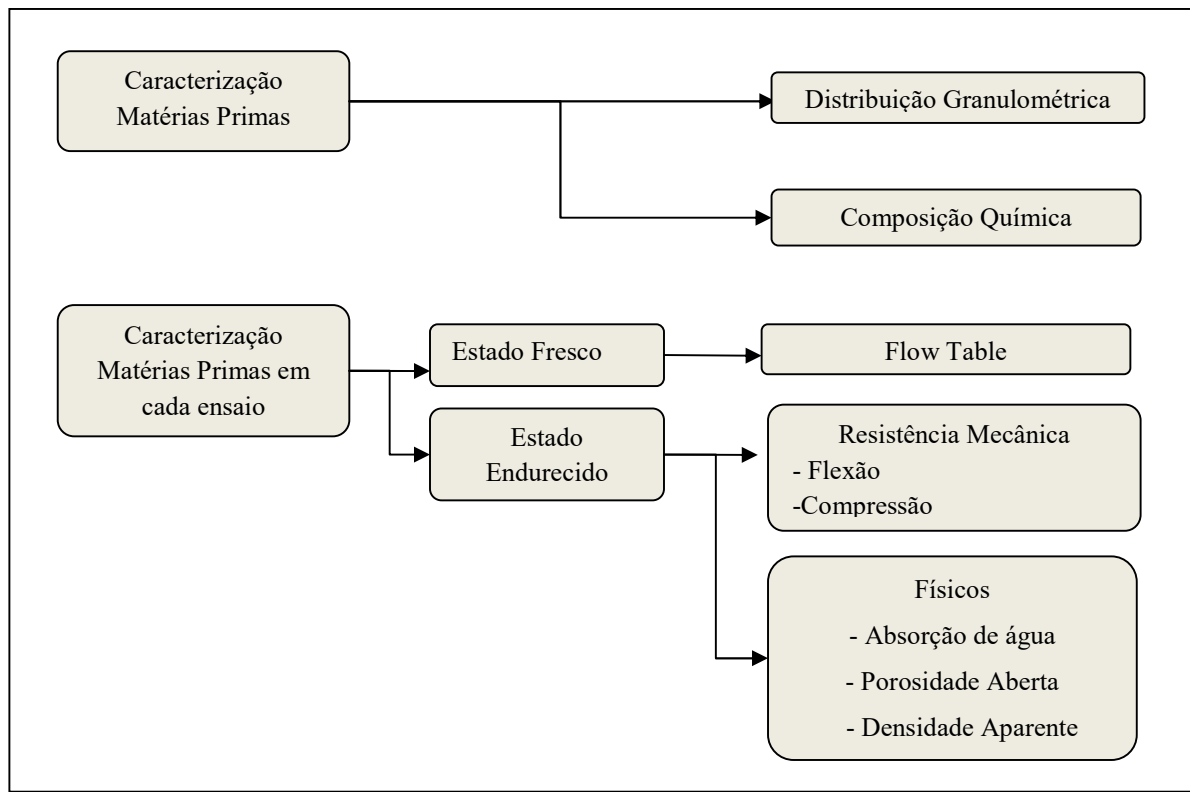
No presente capítulo serão apresentados os materiais utilizados para a obtenção das argamassas geopoliméricas, os métodos e equipamentos empregados e os ensaios aos quais as amostras foram submetidas, bem como as etapas e sequência de desenvolvimento do trabalho.

O desenvolvimento da parte experimental foi realizado no Laboratório de Materiais de construção da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e alguns ensaios foram feitos com auxílio do Departamento de Engenharia Civil do Centro Universitário Católica Santa Catarina – Unidade Joinville.

A argamassa estudada nesse trabalho foi produzida com metacaulim, hidróxido de sódio, silicato, areia e resíduo de concreto reciclado. O concreto reciclado foi substituindo à areia a uma porcentagem de 0%, 25%, 50%, 75% e, por último, 100% de resíduo substituindo à areia na argamassa em peso (gramas).

Para que o objetivo do trabalho fosse alcançado primeiramente foi necessário obter a formulação correta variando a proporção Sólido/Líquido da mistura. Após a definição da formulação foram realizados ensaios de caracterização no estado fresco e endurecido da argamassa. A Figura 5 esquematiza todos os ensaios definidos para o estudo.

Figura 5 – Ensaio realizados para cada formulação.



Fonte: Autor, 2017.

3.1. Materiais

O material escolhido como fonte de alumina foi o Metacaulim. Este material foi fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil. Através de espectrometria de fluorescência de raios-X foram determinados os elementos que compõem o metacaulim e estão representados na Tabela 1. Com estes dados é possível observar que o metacaulim possui quantidades expressivas, tanto de Al_2O_3 quanto de SiO_2 .

Tabela 1- Composição química do metacaulim, determinada por FRX.

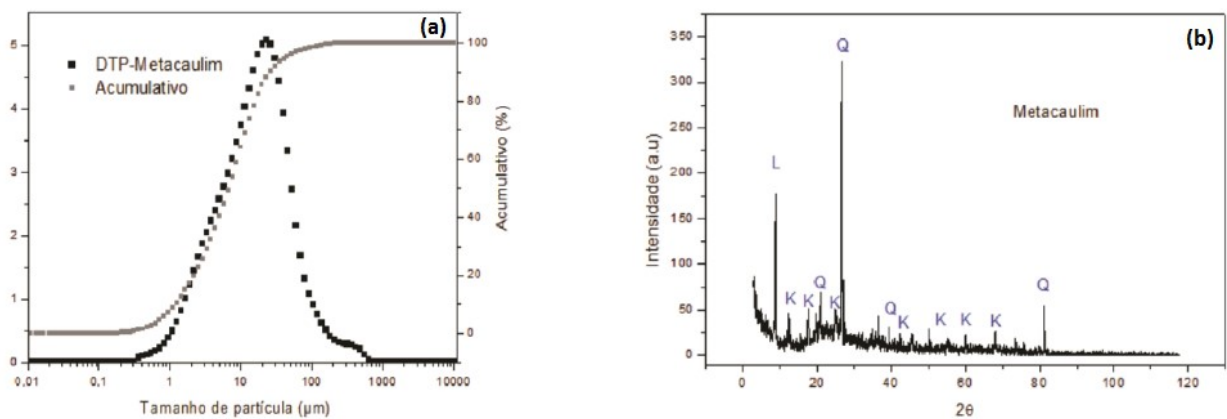
Óxidos	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	MnO	Na_2O	P_2O_5	SiO_2	TiO_2
Metacaulim (%)	32,6	0,1	2,3	2,1	0,6	<0,05	<0,05	0,1	57,1	1,5

Fonte: Núcleo de Pesquisa CERMAT (2015).

A densidade real do metacaulim é igual a $3,17 \text{ g/cm}^3$, foi determinada com o uso de um picnômetro Ultracycrometer 1200 P/N. O tamanho médio das partículas foi de 21

μm e de $D_{50} = 6,5 \mu\text{m}$, conforme mostrado na Figura 6. Através da difração de raios-X foram identificadas as seguintes fases: caulinita (K), quartzo (Q) e mica (L), formadas por Si e Al, mas que apresentam estruturas diferentes (MACCARINI, 2015). Na figura 7 mostra-se o metacaulim utilizado.

Figura 6 – Caracterização do metacaulim: a) Distribuição do tamanho dos grãos, b) Difração de raio X do metacaulim.



Fonte: Núcleo de Pesquisa CERMAT (2015).

Figura 7 – Metacaulim utilizado para a produção da argamassa.



Fonte: Autor (2017).

O ativador alcalino utilizado para este trabalho foi o hidróxido de sódio (NaOH), também conhecido por soda cáustica, contendo 10 mols por litro de solução. É fabricado pela empresa Buschle & Lepper S/A e suas especificações técnicas encontram-se na tabela 2.

Tabela 2 – Composição do hidróxido de sódio.

Determinação	Especificação
Concentração (NaOH) (%)	97,0- 100,0
Carbonatos (Na_2CO_3) (%)	Máx. 0,60
Cloretos (NaCl) (%)	Máx. 0,03
Ferro (Fe) (ppm)	Máx. 6,0
Densidade (g/cm^3)	2,13 – 2,20
Aspecto Visual	Escamas

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

A areia utilizada foi de origem silícea, fornecida pela empresa Supremo Concreto. Foi optado por utilizar uma areia comercial e não experimental, a fim de tornar a argamassa mais próxima da utilizada em uma aplicação comum. Na figura 8 encontra-se a areia utilizada para a fabricação da argamassa geopolimérica. A granulometria desta areia foi determinada utilizando um peneirador de areias vibratório juntamente com peneiras nos tamanhos 0,074, 0,15, 0,3, 0,6, 1,2 e 2,4 mm. A amostra apresentou teor de umidade inferior a 0,1%. A composição granulométrica é apresentada na Figura 9.

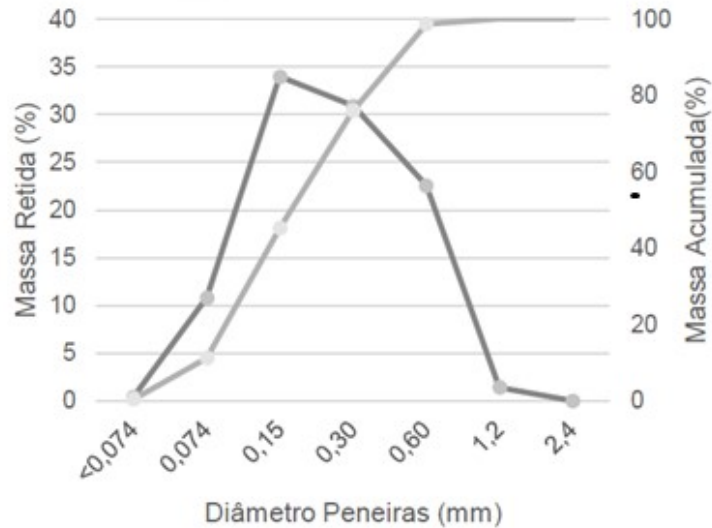
De acordo com a NBR7214 a areia utilizada possui 1,4% de fração grossa, 23% da fração média-grossa, 31% da fração média fina e 34% da fração fina.

Figura 8 – Areia utilizada para a produção das argamassas geopoliméricas.



Fonte: Autor, 2017.

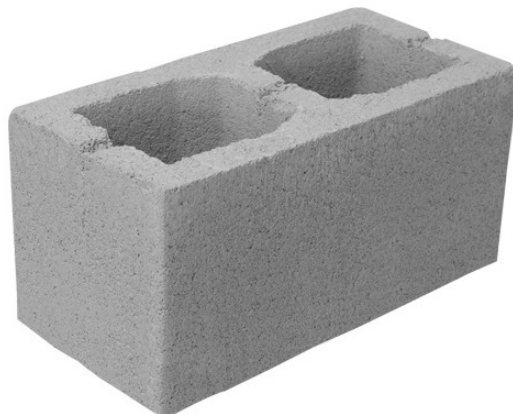
Figura 9 – Granulometria da areia.



Fonte: Autor, 2017.

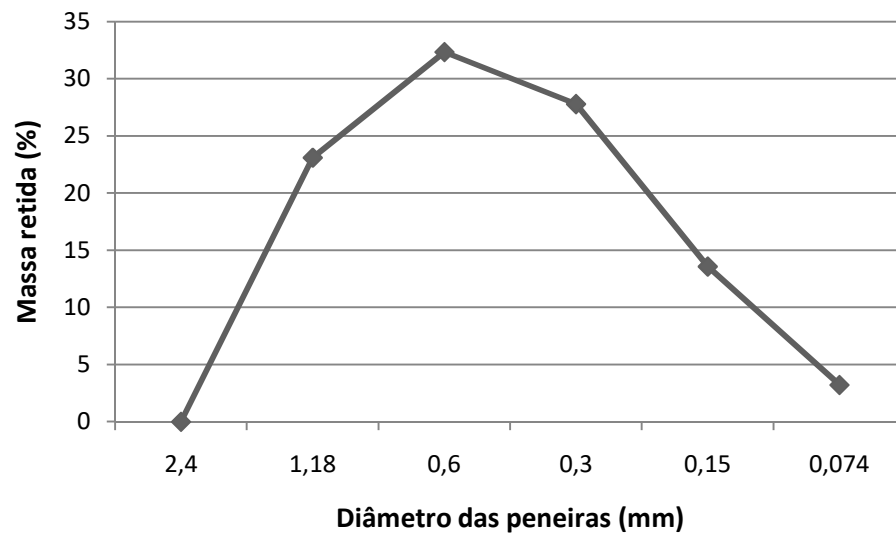
O concreto reciclado também é um dos principais materiais utilizados. Com o uso desse material para a fabricação do geopolímero garante-se que este não será descartado erroneamente na natureza e diminui a quantidade de areia na mistura. Este material foi fornecido pela empresa Enville, de Joinville, em forma de blocos, como mostrado na figura 10. Esse material não seria mais utilizado na construção civil porque são blocos que quebraram durante o transporte ou apresentavam algum tipo de rachadura. A granulometria deste encontra-se na figura 11 e o equipamento utilizado para fazer a granulometria na figura 12.

Figura 10 – Bloco de concreto utilizado para a produção das argamassas.



Fonte: Autor, 2017.

Figura 11 – Granulometria do Concreto Reciclado utilizado na produção das argamassas geopoliméricas.



Fonte: Autor, 2017.

Figura 12 – Peneiras utilizadas para fazer a granulometria do concreto reciclado utilizado para produção das argamassas geopoliméricas.



Fonte: Autor, 2017.

O silicato utilizado foi fornecido pela empresa Buschle & Lepper de Joinville e suas especificações são descritas na tabela 3.

Tabela 3- Características do silicato utilizado na produção das argamassas.

Determinação	Especificação
Densidade a 25°C (g/cm ³)	1,390 – 1,420
Viscosidade (cP)	250 – 500
Óxido de sódio (%)	8,50 – 9,20
Óxido de silício (%)	27,80 – 30,50
Óxidos totais (%)	37,00 – 39,00
Relação (SiO ₂)/ (Na ₂ O)	3,02 – 3,59
Água (%)	61,00 – 63,00

Fonte: Buschle & Lepper, 2014.

A solução ativadora é composta pelo hidróxido de sódio da empresa Unipar Carbocloro, material em forma de escamas com uma pureza entre 97% a 100%. Foi misturada com água para atingir a molaridade desejada de 10 mols. Na figura 13 encontra-se o material utilizado e a solução já pronta.

Figura 13- a) Hidróxido de sódio b) Solução ativadora pronta.



Fonte: Autor, 2017.

3.2. Metodologia experimental

A primeira parte da produção da argamassa em questão consiste em achar a formulação correta para cada traço, produção dos corpos de prova e tempo de cura. A segunda parte consiste em realizar os ensaios propostos.

3.2.1. Produção da argamassa

Foram produzidas cinco formulações em argamassas geopoliméricas a partir de uma formulação de referência. A amostra de referência foi a que não utilizou resíduo, e sua composição encontra-se descrita na tabela 4.

Tabela 4 – Formulação da argamassa de referência.

FORMULAÇÃO ARGAMASSA DE REFERÊNCIA					
TRAÇO	Metacaulim (g)	Areia (g)	NaOH	Silicato (g)	S/L
1:2	500	1000	10 molar	233,50	1,75

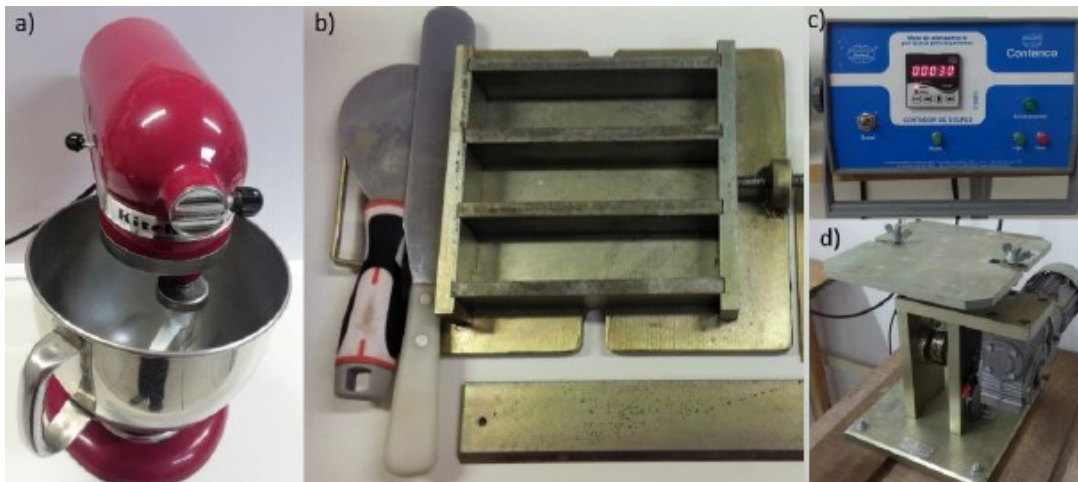
Fonte: Autor, 2017.

O hidróxido de sódio foi dissolvido em água com um agitador magnético até que a solução alcance a temperatura ambiente, obtendo com isso uma solução alcalina, por um total de 24 horas.

Os blocos de concreto danificados foram moídos e peneirados. Em seguida, com o concreto já moído e peneirado e o hidróxido já dissolvido, as argamassas geopoliméricas começaram a serem produzidas. Foi pesado o metacaulim, concreto reciclado, solução aquosa de hidróxido de sódio e silicato. Posteriormente, levou-se ao misturador a solução juntamente com o silicato num tempo total de 5 minutos para então misturar o metacaulim e deixar por um período de 10 minutos, intercalando de 5 em 5 minutos para mexer manualmente por 1 minuto entre esse intervalo. Por fim, a areia e/ou o concreto reciclado foram adicionados a mistura e misturou-se por mais 2 minutos.

Posteriormente, com a argamassa pronta, a mistura foi para os moldes prismáticos. A produção dos corpos de prova foi executada de acordo com a norma NBR 13279. Após colocar nos moldes as amostras foram para a estufa para serem curadas a 40°C por 24h. Na figura 14 encontram-se todos os equipamentos utilizados para a produção.

Figura 14 – Equipamentos utilizados na preparação da argamassa geopolimérica – a) misturador, b) espátulas e moldes, c) contador de golpes, d) mesa de adensamento.



Fonte: Autor, 2017.

3.2.2. Ensaio no estado fresco

Os ensaios no estado fresco têm o objetivo de avaliar as misturas quanto à consistência e plasticidade. O ensaio, mesa de consistência (flow table), especificado nas normas NBR7215 e NBR13276 foi utilizado em todas as formulações para garantir que estejam de acordo com as especificações. Na figura 15 encontra-se o equipamento que foi utilizado para este ensaio.

Figura 15 – Mesa de adensamento para realizar o ensaio no estado fresco.



Fonte: Autor, 2017.

3.2.3. Ensaio no estado endurecido

O primeiro ensaio realizado no estado endurecido foi o de flexão e compressão. Após a desmoldagem os corpos de prova foram armazenados em estufa por 24 horas. Após esse período os corpos de provas foram submetidos a ensaios de flexão e compressão no laboratório de resistência dos materiais do Centro Universitário Católica de Santa Catarina, em Joinville. Todo o procedimento teve o acompanhamento do Instrutor de Laboratório de Eng. Civil, Robson Luiz Rosa. O experimento foi efetuado em uma máquina universal para ensaios mecânicos de tração, compressão, flexão de modelo EMIC 23-100 de marca INSTRON/EMIC. Suas principais características são: Capacidade: 100kN (10000kgf); Tipo: Dupla Coluna Autoportante e Acionamento através de fusos de esferas recirculantes pré-carregados com sistema de colunas guias cilíndricas (EMIC, 2016). A figura 16 apresenta os equipamentos utilizados nos ensaios do estado endurecido.

Figura 16 – Equipamentos utilizados no estado endurecido – a) Máquina universal para ensaios mecânicos, b) Estufa.



Fonte: Autor, 2017.

Depois de rompidas as amostras através do ensaio de flexão e compressão foram realizados os ensaios físicos para determinar densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. O método escolhido segue o princípio de Arquimedes e o mesmo foi adotado por Pennings e Grellner (1989) na caracterização de materiais porosos. Este consiste basicamente em:

- Secagem da amostra a 100°C e pesagem em uma balança analítica com precisão de 0,01g: (m_s)
- Imersão dos corpos de prova em água por 72 horas, seguido da pesagem imersa (m_i)
- Pesagem da amostra após secagem de sua superfície (m_{sss})

Onde:

m_s = massa seca

m_i = massa imersa

m_{sss} = massa saturada com superfície seca

Após a coleta de todos os pesos, utilizando as equações Eq. 2, 3 e 4, foi possível determinar a densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta das formulações no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Santa Catarina.

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

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

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

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios realizados nas argamassas geopoliméricas em estado fresco e endurecido. No estado endurecido foi calculada a densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. E, foram avaliadas as resistências a compressão e flexão com 28 dias de cura. No ensaio fresco foi avaliada a trabalhabilidade.

Tem-se também a análise dos resultados, procurando justificá-los com base na adição dos materiais nas formulações apresentadas. Para a trabalhabilidade foi realizado ensaio de Flow Table Test para todas as formulações. Os resultados de densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água foram obtidos pela média no ensaio de 8 amostras para cada formulação, para 28 dias de cura. Os dados de flexão e compressão tiveram 3 amostras de cada formulação para os 28 dias de cura, para que fosse feito a média. A tabela 5 apresenta a composição utilizada para cada formulação, onde S/L é a relação sólido líquido utilizado na mistura, e na figura 17 os corpos de prova produzidos com 28 dias de cura.

Tabela 5 – Composição utilizada para cada formulação.

Nome	Argamassa	S/L	Metacaulim	Areia	Concreto reciclado	Solução	Silicato
			(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
0%	1500	1,75	500	1000	0	192,01	233,50
25%	1500	1,65	500	750	250	203,65	247,65
50%	1500	1,6	500	500	500	210,01	255,39
75%	1500	1,55	500	250	750	216,79	263,63
100%	1500	1,6	500	0	1000	210,01	255,39

Fonte: Autor, 2017.

Figura 17 – Corpos de prova produzidos com 28 dias de cura.



Fonte: Autor, 2017.

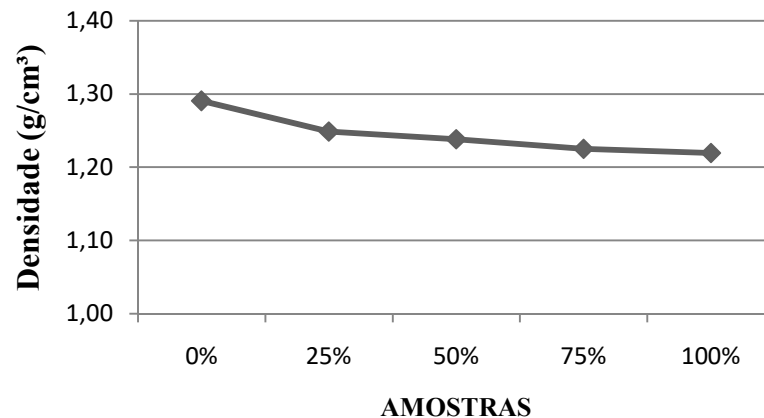
4.1. Trabalhabilidade

No estado fresco foi testada a trabalhabilidade de todas as composições através do ensaio Flow Table. Não existe ainda norma para trabalhabilidade de argamassa geopolimérica, então os valores pré-estabelecidos foram determinados por ensaios previamente feitos, observando visualmente a coesão da argamassa geopolimérica. A relação sólido líquido foi testada até cada formulação atingir uma consistência aceitável. A consistência de referência utilizada foi de uma abertura de 240 mm. Sendo testadas todas as formulações até atingir essa abertura com um desvio padrão máximo de 2 mm.

4.2. Densidade Aparente

Foram obtidos os resultados de densidade aparente para as formulações de argamassa geopolimérica aos 28 dias de cura e o resultado encontra-se na figura abaixo.

Figura 18 – Densidade aparente das argamassas geopoliméricas com 28 dias de cura.



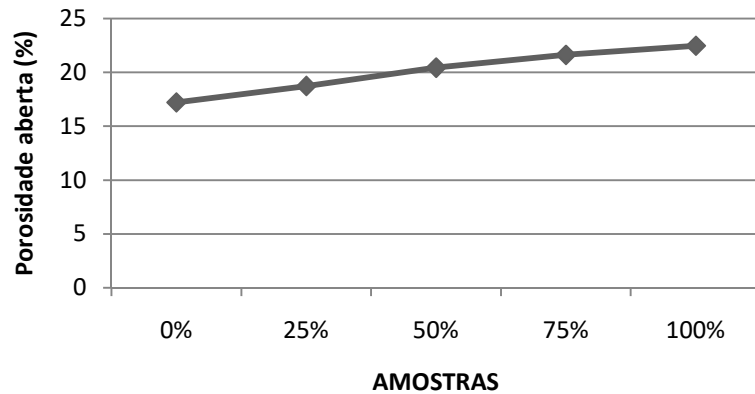
Fonte: Autor, 2017.

Os resultados de densidade aparente mostram que esta foi influenciada diretamente pelo teor de concreto reciclado incorporado na mistura, e que a incorporação de 100% de resíduo resultou na redução de aproximadamente 5,49% da densidade em relação à formulação de referência. Foram feitos 3 ensaios para cada formulação e todos apresentaram um desvio padrão relativamente baixo, sendo, com base em cálculos, o maior para a formulação com 0% de resíduo com 28 dias de cura que foi de 0,020 g/cm³.

4.3. Porosidade Aberta

Foram obtidos os resultados de porosidade aberta para as formulações de argamassa geopolimérica aos 28 dias de cura, e como esperado a porosidade aberta apresentou um resultado inversamente proporcional ao de densidade aparente, ou seja, os maiores percentuais foram encontrados nas formulações com menor densidade aparente. Os resultados obtidos encontram-se na figura 19 abaixo.

Figura 19 – Porosidade aberta das argamassas geopoliméricas com 28 dias de cura.



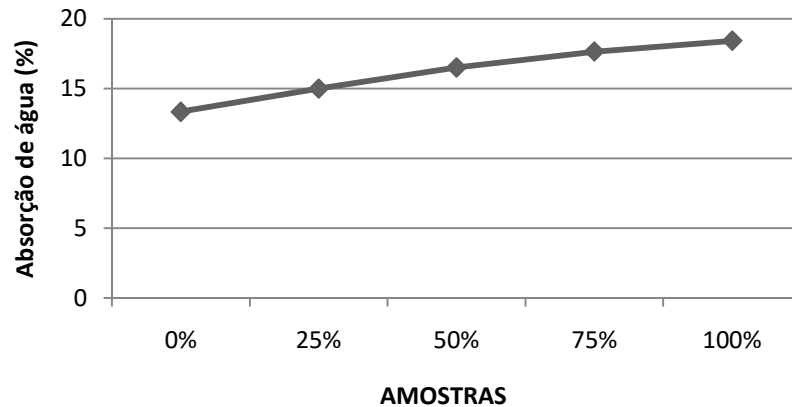
Fonte: Autor, 2017.

Neste caso, quanto maior a porosidade aberta da amostra, maior será também sua absorção de água, o que se justifica devido aumento do número de vazios. O espaço da argamassa não ocupada por sólidos e ocupado pela água e ar compõem o espaço poroso, o que justifica ter aumentado a porosidade na formulação com 100% de resíduo, uma vez que a quantidade de silicato e de solução foi maior para essa amostra. Todas as amostras apresentaram um desvio padrão baixo, sendo a amostra com maior desvio padrão a formulação que contém 75% de resíduo, com 0,59 %.

4.4. Absorção de Água

Foram obtidos os resultados de absorção de água para as formulações de argamassa geopolimérica aos 28 dias de cura. Como esperado a absorção de água apresentou comportamento diretamente proporcional ao de porosidade aberta e inversamente proporcional ao de densidade aparente. E, a causa disto, é a mesma dado a porosidade aberta, quanto maior a quantidade de resíduos na mistura maior o consumo de silicato e solução. E, a formulação que apresentou maior desvio padrão foi a de 75% de resíduo, com 0,54%. Os resultados obtidos encontram-se na figura 20 abaixo.

Figura 20 – Absorção de água nas argamassas geopoliméricas com 28 dias de cura.



Fonte: Autor, 2017.

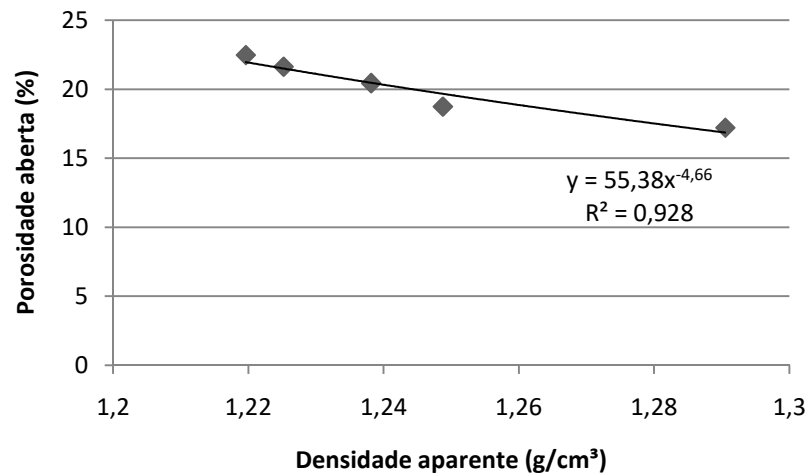
De uma forma resumida, na tabela 6 encontram-se os valores médios calculados dos índices físicos de cada formulação e seus respectivos desvios padrões. E, nas figuras 21 e 22, tem-se uma relação entre porosidade aberta com a absorção de água e densidade aparente. Essas relações apresentam uma linha de tendência de potência com sua respectiva equação e R^2 . Quanto maior a densidade menor é a porosidade aberta, pois quanto mais denso uma argamassa menor é a quantidade de vazios existente nela. E, quanto maior a porosidade aberta, maior é a absorção de água.

Tabela 6 – Valores médios dos índices físicos para cada formulação e seus respectivos desvios padrões.

AMOSTRAS	D.A	A.A	P.A	Desvio padrão D.A	Desvio padrão A.A	Desvio padrão P.A
0%	1,29	13,33	17,2	0,01	0,12	0,11
25%	1,24	14,99	18,69	0,02	0,16	0,47
50%	1,24	16,49	20,45	0,01	0,18	0,3
75%	1,24	17,61	21,57	0,01	0,54	0,59
100%	1,22	18,4	22,46	0,01	0,28	0,26

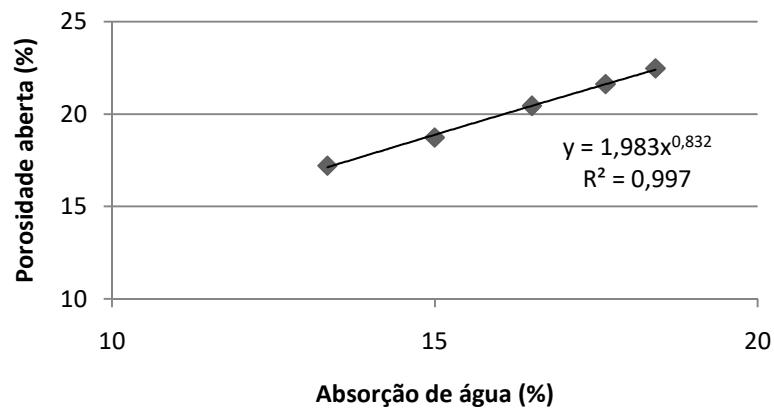
Fonte: Autor, 2017.

Figura 21– Relação entre a porosidade aberta e densidade aparente das argamassas geopoliméricas com 28 dias de cura.



Fonte: Autor, 2017.

Figura 22– Relação entre a porosidade aberta e a absorção de água das argamassas geopoliméricas com 28 dias de cura.



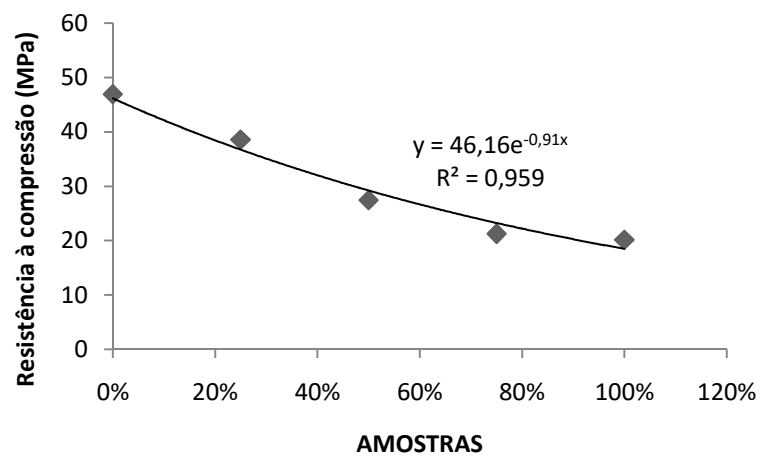
Fonte: Autor, 2017.

4.5. Resistência a flexão e a compressão

Foram obtidos os resultados de compressão e flexão para as formulações de argamassa geopolimérica aos 28 dias de cura, representados pelo valor médio de três corpos de provas rompidos. A formulação 0% de resíduo, contendo apenas areia e metacaulim, atingiu as maiores resistências entre as amostras ensaiadas, apresentando uma média de 9,54 MPa de resistência à flexão e 46,93 MPa de resistência a compressão.

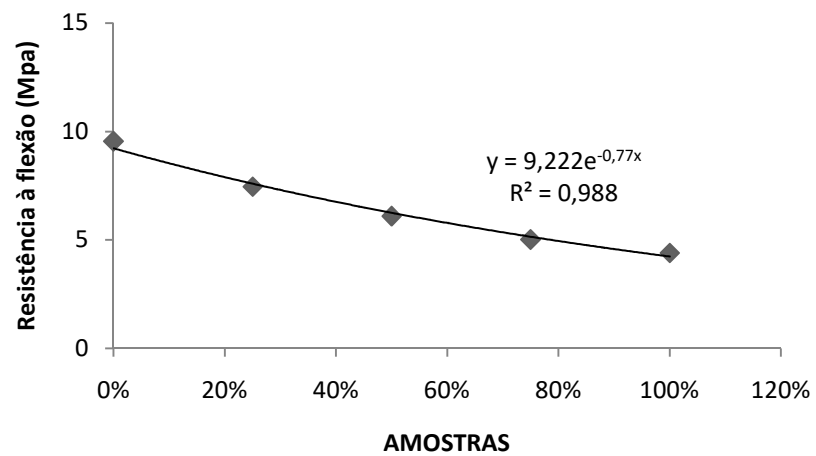
A resistência à compressão está diretamente relacionada ao grau de polimerização alcançado na mistura, conferindo, assim, maior resistência mecânica quanto mais polimerizada for a estrutura formada. E, observa-se que quanto maior a quantidade de resíduo menor é a resistência da argamassa. Os resultados obtidos para resistência a compressão e flexão das argamassas geopoliméricas encontram-se na figura 23 e 24 abaixo, apresentam uma linha de tendência exponencial com sua respectiva equação e R^2 .

Figura 23 – Valores obtidos de resistência a compressão para as argamassas geopoliméricas.



Fonte: Autor, 2017.

Figura 24 – Valores obtidos de resistência a flexão para as argamassas geopoliméricas.



Fonte: Autor, 2017.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho foi possível concluir que o concreto reciclado influenciou nas propriedades no estado fresco das argamassas geopoliméricas independente do período analisado.

Os resultados de densidade aparente indicaram que o aumento da dosagem de concreto reciclado resultou no decréscimo da densidade aparente, sendo a maior variação entre a formulação de 0% de resíduo e a amostra com 100% de resíduo, com 1,29 g/cm³ e 1,22 g/cm³ respectivamente. A vantagem desse decréscimo de densidade é que o material torna-se mais leve, podendo diminuir o peso da fundação da obra e da estrutura.

À medida que aumentou a quantidade de resíduos na mistura maiores foram os valores obtidos de absorção de água e porosidade aberta. Isso se explica pelo fato do resíduo utilizado absorver uma quantidade maior de água que a areia. E, para conseguir obter uma boa trabalhabilidade no teste Flow Table foram acrescentadas maiores quantidades de silicato e hidróxido de sódio na mistura à medida em que se acrescentou resíduo.

A formulação que obteve melhores resultados foi a que não utilizou resíduo, possui 9,54 MPa de resistência à flexão e 46,93 MPa de resistência à compressão. Em contrapartida, a formulação que utilizou o resíduo obteve um desempenho menor, apresentou 4,40 MPa de resistência à flexão e 20,16 MPa de resistência à compressão.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Avaliar a influência do concreto reciclado sob condições diferentes de cura.

Testar o comportamento do material para período mais prolongado cura.

Adicionar agregados graúdos de modo a obter um concreto.

Testar as formulações propostas com diferentes concentrações molares.

REFERÊNCIAS

CASCAES, Maria Eugenia Linhares. **Desenvolvimento do Geopolímero a partir de uso do Metacaulim e cinza de casca de arroz.** 2016. 46 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

DAVIDOVITS J. **Properties of geopolymers cements.** Geopolymer institute. Alkline Cements and Concretes, KIEV Ukraine, 1994, p,19.

ESTUDO comparativo da análise do ciclo de vida de concreto polímero e de concretos à base de cimento portland. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, 19 abr. 2014.

GEO-POL. **Cimento GP.** São Paulo: Geo-pol, 2009. Disponível em: <http://www.geopolymer.com.br/PDF/FT_CIM_GP.pdf>. Acesso em: 19 out. 2009.

_____. **Geopolímero para principiantes.** Disponível em: <<http://www.geopolymer.com.br/PDF/apresentacao.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2016.

_____. **Origem do cimento geopolimérico.** Disponível em: <<http://www.geopolimero.com.br/PDF/Origem.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2016.

MACCARINI, Helena Sommer. **Desenvolvimento de Geopolímero a partir do uso de Metacaulim.** 2015. 59 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

SKAF, Tatiana Borges. **Influência de matérias primas na microestrutura e resistência em compósitos geopoliméricos.** 2008. 118 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

SOUZA, Renata Domiciano Zanella de. **Estudo da influência do ativador alcalino nas propriedades mecânicas do geopolímero.** 2012. 26 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2012.

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

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

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

BIGNO, I. **Geopolímeros à base de resíduos agrícolas e agroindustriais.** 2008. 280 f. Tese de doutorado em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia.

CUNHA, M. **Durabilidade de geopolímeros monofásicos.**2013. Dissertação de mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

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

VASSALO, E. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado.** 2013. 104 f. Dissertação de mestrado em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais.