



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LUCAS GIOVANNI COSTA DE ARAÚJO E ARAÚJO

**CARACTERIZAÇÃO DESTRUTIVA E NÃO DESTRUTIVA DE CONCRETO
GEOPOLIMÉRICO ÁLCALI-ATIVADO COM BASE EM METACAILIM**

João Pessoa – PB

Outubro de 2018

LUCAS GIOVANNI COSTA DE ARAÚJO E ARAÚJO

**CARACTERIZAÇÃO DESTRUTIVA E NÃO DESTRUTIVA DE CONCRETO
GEOPOLIMÉRICO ÁLCALI-ATIVADO COM BASE EM METACAUIM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental referente ao curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba como requisito necessário para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Hidelbrando José Farkat Diógenes

JOÃO PESSOA

2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A663c Araújo, Lucas Giovanni Costa de Araújo e.

Caracterização destrutiva e não destrutiva de concreto geopolimérico álcali-ativado com base em metacaulim / Lucas Giovanni Costa de Araújo e Araújo. - João Pessoa, 2018.

56 f. : il.

Orientação: Hidelbrando José Farkat Diógenes.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Geopolímero. 2. Sustentabilidade. 3. Construção Civil. I. Diógenes, Hidelbrando José Farkat. II. Título.

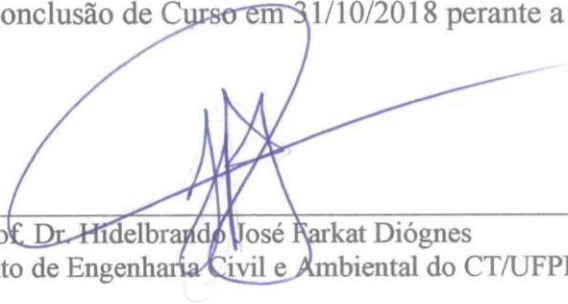
UFPB/BC

FOLHA DE APROVAÇÃO

LUCAS GIOVANNI COSTA DE ARAÚJO E ARAÚJO


CARACTERIZAÇÃO DESTRUTIVA E NÃO DESTRUTIVA DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO ÁLCALI-ATIVADO COM BASE EM METACAULIM

Trabalho de Conclusão de Curso em 31/10/2018 perante a seguinte Comissão Julgadora:



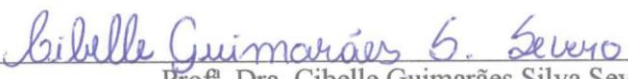
Prof. Dr. Hidelbrando José Farkat Diógenes
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Aprovado




Prof.ª. Dra. Andrea Brasiliano Silva
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Aprovado



Prof.ª. Dra. Cibelle Guimarães Silva Severo
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Aprovado



Prof.ª. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga
Matrícula Siape: 1668619
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer à Deus, por me acompanhar e iluminar o meu caminho ao longo de toda a minha vida.

Aos meus pais, Paulo Vandeci de Araújo e Marli Costa de Araújo e Araújo, e ao meu irmão Thales Matheus Costa de Araújo e Araújo, por estarem sempre ao meu lado, incentivarem incessantemente meus estudos e oferecerem sempre o melhor suporte possível na minha caminhada, obrigado pela confiança depositada em mim. Tomo minha família de inspiração e base para meu caráter e minhas atitudes. Sem ela, nada disso seria possível.

Aos grandes amigos Josenildo e Paulo Sérgio, que me acompanham desde cedo e mesmo com a distância estão sempre presentes de alguma forma.

Ao Prof. Dr. Hidelbrando José Farkat Diógenes, por me aceitar como seu orientando e disponibilizar seu tempo e conhecimento para a produção deste trabalho. Quero agradecer também aos seus alunos de mestrado, Lisarb Brasil e Kildemberg Nunes, pelo apoio na produção da monografia e realização dos ensaios.

Ao Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo e a Prof^a. Dra. Cibelle Guimarães Silva Severo pelo auxílio na pesquisa e no conhecimento dos materiais geopoliméricos.

À todos os professores que tive durante o curso por contribuírem com minha evolução acadêmica e pessoal. Agradecimento especial ao Prof. Dr. Ricardo Almeida de Melo, que, juntamente com seu aluno de mestrado Bismak Oliveira de Queiroz, me abriram as portas da pesquisa científica, e ao Prof. Dr. Primo Fernandes Filho, pela orientação na monitoria da disciplina de Resistência dos Materiais II.

Aos funcionários do LAPAV e do LABEME por me cederem o espaço e o material necessários para o desenvolvimento da pesquisa. Aos estagiários do LABEME, Pedro Siqueira, Raimundo Gonçalves e Danilo Henrique, pelo auxílio nas atividades e ensaios no laboratório.

Aos amigos que adquiri durante o curso, em especial à, Arthur Arão, Edembergue Lima, Lucas Matheus e Lucas Quintino, que me acompanharam em praticamente todo o curso e me acolheram como uma família aqui na cidade de João Pessoa.

Aos amigos Eduardo José, Pedro Siqueira, João Paulo e Lucas Quintino pelas muitas horas de jogatina e descontração, se tornando uma válvula de escape no período final do curso.

À todas as pessoas que, diretamente ou indiretamente, me auxiliaram no fechamento de mais um ciclo na minha vida e no meu desenvolvimento durante todo este período de formação.

“A verdadeira motivação vem de realização, desenvolvimento pessoal, satisfação no trabalho e reconhecimento.”

(Frederick Herzberg)

RESUMO

Os materiais derivados do cimento Portland são indispensáveis para a construção civil, porém o impacto ambiental do seu processo produtivo é alto, 5% da emissão global de CO₂ advém dessa fonte. Diante disso, há o crescimento nas pesquisas em aglomerantes sustentáveis. Os geopolímeros formam uma nova geração de aglomerantes e são obtidos a partir da ativação alcalina de uma matriz inorgânica, fonte de sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃). Os materiais geopoliméricos possuem propriedades mecânicas equiparáveis aos derivados de cimento Portland, maior durabilidade e menores impactos ambientais. Este trabalho procurou avaliar um concreto geopolimérico, obtido pela ativação do metacaulim por silicato de sódio e hidróxido de sódio, como uma possível alternativa ao concreto convencional através da caracterização não destrutiva, aferindo o módulo elástico dinâmico e o amortecimento do material, e da caracterização destrutiva, medindo sua resistência à compressão, além de um comparativo de custo em relação ao concreto de cimento Portland. Os resultados dos ensaios foram satisfatórios, apresentando uma resistência média na faixa de 29 MPa, um módulo elástico dinâmico de 15,85 GPa e um amortecimento de 0,89%, aos 14 dias de idade, mostrando o concreto geopolimérico como possível substituto do concreto tradicional, exceto em relação ao custo demandado na obtenção do geopolímero, atualmente, dificuldade encontrada em tecnologias recentes.

Palavras chaves: geopolímero, sustentabilidade, construção civil.

ABSTRACT

Portland cement materials are indispensable for civil construction, but the environmental impact of its production process is high, 5% of the global CO₂ emission comes from this source. Therefore, researches on sustainable binders are growing. Geopolymers form a new generation of binders and are obtained from the alkaline activation of an inorganic matrix, source of silica (SiO₂) and alumina (Al₂O₃). The geopolymer materials have the same mechanical properties as Portland cement derivatives, greater durability and lower environmental impacts. This paper aimed to evaluate a geopolymer concrete, obtained by the activation of metakaolin by sodium silicate and sodium hydroxide, as a possible alternative to conventional concrete by non-destructive characterization, by measuring the dynamic elastic modulus and the damping of the material, and the destructive characterization, measuring its uniaxial compressive strength, as well as a cost comparison with Portland cement concrete. The results of the tests were satisfactory, presenting a compressive resistance in the range of 29 MPa, a dynamic elastic modulus of 15,85 GPa and a damping of 0,89%, at 14 days of age, showing the geopolymer concrete as a possible substitute for the traditional concrete, except in relation to the cost demanded in obtaining the geopolymer, currently, difficulty found in recent technologies.

Keywords: geopolymers, sustainability, civil construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Série histórica do consumo de cimento.	16
Figura 2 - Caulim.....	19
Figura 3 - Relações molares entre óxidos na mistura dos reagentes.	20
Figura 4 - Estrutura das ligações químicas no geopolímero (Na-Polissialato).....	21
Figura 5 - Estrutura molecular de alguns geopolímeros.....	22
Figura 6 - Estruturas com geopolímero. (a) O Coliseu de Roma, com 1938 anos de idade (b) Acrópole de Atenas, com cerca de 2468 anos de idade.....	24
Figura 7 - Pirâmides do Egito.....	24
Figura 8 - Demanda energética e emissão de CO ₂ no ciclo de vida do concreto de cimento Portland.....	26
Figura 9 - Demanda energética e emissão de CO ₂ no ciclo de vida do concreto geopolimérico.	27
Figura 10 - Fluxograma de atividades.	34
Figura 11 - Metacaulim.	35
Figura 12 - Propriedades do Metacaulim HP ULTRA.....	36
Figura 13 - Análise do DRX.....	35
Figura 14 - (a) Silicato de sódio (b) Hidróxido de sódio.....	37
Figura 15 - Agregado miúdo.	38
Figura 16 - Gráfico do ensaio de granulometria do agregado miúdo.....	39
Figura 17 - Agregado graúdo.....	39
Figura 18 - Cimento CP II - Z 32.	40
Figura 19 - Ensaio não destrutivo na Sonelastic [®]	42
Figura 20 - Ensaio de resistência à compressão.	43
Figura 21 - Fluxograma para preparação do concreto geopolimérico.....	43
Figura 22 - (a) Molde e corpo de prova (b) Uso do plástico filme.....	44
Figura 23 - Resistência do concreto geopolimérico ao longo do tempo.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do silicato de sódio.	37
Tabela 2 - Ensaio de granulometria do agregado miúdo.	38
Tabela 3 - Traços unitários em massa avaliados.	41
Tabela 4 – Resultados para a resistência à compressão.	45
Tabela 5 – Resultados do módulo elástico dinâmico longitudinal.	46
Tabela 6 – Resultados do amortecimento.	47
Tabela 7 - Preços de insumos para concreto.	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Contexto e motivação	13
1.2. Justificativa	14
1.3. Objetivo	14
1.4. Estrutura do TCC	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. Cimento Portland	16
2.2. Geopolímero	17
2.2.1. Metacaulim	18
2.2.2. Química dos geopolímeros	20
2.2.3. Características gerais	22
2.2.4. Materiais alternativos como matéria-prima.....	27
2.2.5. Comentários sobre as propriedades dinâmicas dos geopolímeros.....	29
2.2.6. Desafios para a difusão do concreto geopolimérico.....	31
2.3. Evidências extraídas do referencial teórico	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1. Materiais utilizados	34
3.1.1. Metacaulim	35
3.1.2. Solução Ativadora	36
3.1.3. Agregados	37
3.1.4. Cimento	39
3.2. Composição do traço	40
3.3. Caracterização não destrutiva	41
3.4. Caracterização destrutiva	42
3.5. Corpos de prova	43
3.6. Comparativo de custo	44
4. RESULTADOS	45
4.1. Resistência à compressão	45
4.2. Módulo de elasticidade dinâmico	46
4.3. Amortecimento	47

4.4. Comparativo de custo	48
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
5.1. Conclusões	50
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto e motivação

A indústria da construção trabalha diariamente com grandes volumes de insumos, tendo um grande impacto em praticamente todo o contexto que a rodeia. Assim, esse segmento tem papel fundamental para a realização dos objetivos globais de desenvolvimento sustentável. A questão ambiental na atividade da construção civil e na gestão de edifícios públicos e privados ganhou relevância nos últimos anos (ALLEM, 2016).

Segundo Davidovits (1994), a cada tonelada de clínquer de cimento Portland fabricado, equivale a 0,95 toneladas de dióxido de carbono liberados na atmosfera. Durante o século XX o concreto convencional foi o material de construção mais utilizado em todo o mundo, e a tendência para o século XXI é de aumento de sua demanda (GARCIA; GARCIA; MENDES, 2014).

Dessa forma, um desafio deve ser enfrentado pela indústria do concreto nos dias atuais, o qual consiste na busca de materiais alternativos ao concreto convencional, tais como resíduos industriais e algumas adições minerais, com o objetivo de diminuir o consumo de cimento Portland, desenvolvendo projetos que tenham como foco reduzir os impactos ambientais, tema que tem sido objeto de pesquisa frequente nos últimos anos (TORRALBA; GOMES; JALALI, 2005).

No âmbito da procura desses novos materiais sustentáveis que possuam maior desempenho mecânico, estabilidade e durabilidade que os tradicionalmente usados, surgem os cimentos geopoliméricos, também chamados de Geopolímeros ou Polímeros inorgânicos (CABALLERO, 2017).

De acordo com Mazza (2010), França, Austrália, Estados Unidos, África do Sul e Brasil são somente alguns dos países que estudam esse tipo de material, sendo o Brasil um dos expoentes na área, tendo o IME (Instituto Militar de Engenharia) como uma das principais fontes de pesquisas realizadas no país.

Os geopolímeros são ligantes obtidos através da ativação alcalina em materiais silicoaluminosos, podendo ser os precursores: fontes minerais naturais, resíduos industriais e outros materiais com características pozolânicas. Os geopolímeros apresentam-se como

materiais de excelentes propriedades físicas e mecânicas como a sua durabilidade, resistência ao ataque de ácidos, e elevada resistência mecânica inicial (DAVIDOVITS, 1991).

Nesse contexto, o presente trabalho busca avaliar a geopolimerização do metacaulim como um aglomerante alternativo ao cimento Portland para a utilização em elementos de concreto.

1.2. Justificativa

A fim de contribuir no âmbito científico, tecnológico e ambiental, é de consenso que estudos que objetivem utilização de materiais geopoliméricos sejam desenvolvidos, utilizando em especial matérias-primas disponíveis em território nacional.

Do ponto de vista científico, diversos são os estudos sobre os materiais geopoliméricos no Brasil e no mundo (DAVIDOVITS, 1991; DAVIDOVITS, 1994; TORGAL; GOMES; JALALI, 2005; MAZZA, 2010), à vista disso o presente trabalho se propõe a analisar, além da resistência à compressão, propriedades dinâmicas e a aptidão comercial desse tipo de produto na região de João Pessoa - PB, complementando estudos realizados nessa área.

No aspecto tecnológico, o presente TCC se faz necessário no contexto do aprimoramento contínuo das metodologias de produção para concretos geopoliméricos, de modo a atender o mercado da construção.

E por último, mas não menos importante, a sustentabilidade do ambiente construído, que é um tema atual em todas as indústrias, tendo a construção civil uma parcela significativa na emissão de poluentes e, portanto, sendo imperativo o desenvolvimento de técnicas menos agressivas ao meio ambiente. Para Borges *et al.* (2014), o geopolímero se mostra bastante atraente em relação a este aspecto por diminuir a demanda energética e a emissão de CO₂ em relação ao cimento Portland convencional.

1.3. Objetivo

O presente trabalho final de conclusão de curso, objetiva analisar o comportamento mecânico, estático e dinâmico do concreto geopolimérico com base em metacaulim, de modo a avaliar o geopolímero como uma possível alternativa ao concreto de cimento Portland. Para tanto, os seguintes objetivos foram estabelecidos:

- Avaliar ao longo das primeiras idades, utilizando métodos destrutivos, a resistência à compressão, e, utilizando métodos não destrutivos, o módulo de elasticidade e o amortecimento do material.
- Realizar um estudo de custo comparando o preço dos insumos presentes nos traços para os dois materiais, o concreto geopolimérico e o convencional.

1.4. Estrutura do TCC

O trabalho se divide em cinco capítulos, que incluem: Introdução, Revisão bibliográfica, Materiais e métodos, Resultados e as Considerações finais.

Na primeira parte, na Introdução, o trabalho é situado no contexto das pesquisas por materiais alternativos para a indústria da construção civil na atualidade, sendo definidos também a sua motivação, os objetivos e a estrutura do trabalho.

No segundo tópico, na Revisão bibliográfica, ocorre o enfoque sobre os geopolímeros, mostrando um pouco do seu histórico, da química envolvida no processo, dos materiais empregados, das características gerais, com base em pesquisas realizadas.

Em Materiais e métodos, é colocada a forma como a pesquisa foi realizada para o presente trabalho, assim como os materiais utilizados.

Na parte dos Resultados, são apresentados e analisados os resultados obtidos experimentalmente.

E, por fim, o item de Considerações finais mostra as conclusões da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros. Nas Referências bibliográficas são citados os trabalhos que foram consultados no curso do trabalho.

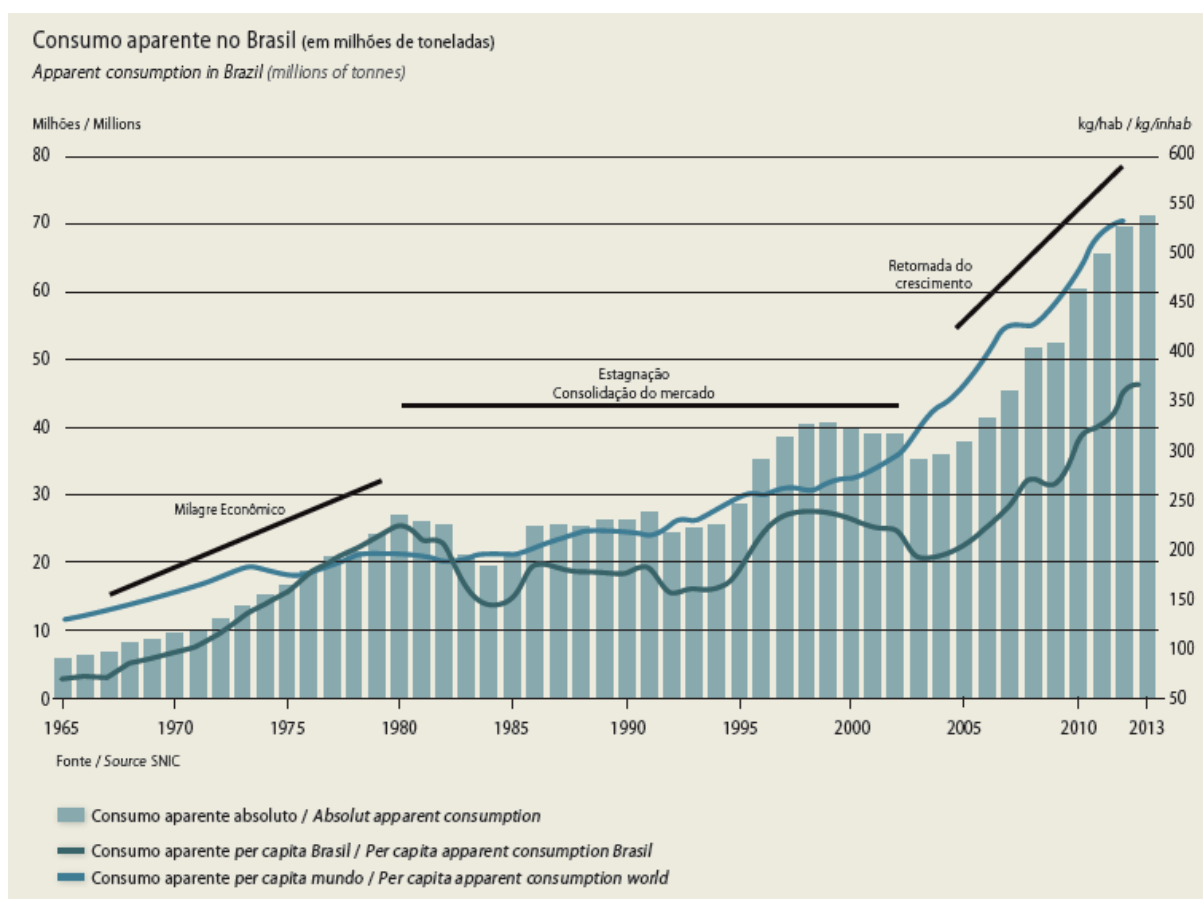
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cimento Portland

O cimento Portland é o material de construção de maior utilização no mundo, utilizado na composição de concretos e argamassas, e confere a estes boa trabalhabilidade no estado fresco. No estado endurecido, o cimento Portland geralmente é responsável pelo desenvolvimento de resistência mecânica elevada e boa durabilidade de argamassas e concretos (BORGES *et al.*, 2014).

No Brasil, de acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2013), o consumo aparente de cimento terminou o ano de 2013 com 71 milhões de toneladas e o consumo *per capita* alcançou 353 kg/hab.ano. Na Figura 1 é mostrada a série histórica do consumo aparente total de cimento no Brasil, do consumo per capita do Brasil e do mundo.

Figura 1 - Série histórica do consumo de cimento.



Fonte: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2013).

Os concretos mais comuns, de resistência à compressão entre 15 MPa e 50 MPa, são os mais utilizados em todo mundo, mesmo assim muitas construções ficam sujeitas às

patologias que trazem desconforto visual e problemas na utilização e no desempenho da edificação. Atualmente, um dos grandes desafios da tecnologia da construção é melhorar a durabilidade de edificações, possibilitar recuperação de estruturas danificadas e o entendimento profundo do funcionamento químico e mecânico dos concretos. Para isso novos tipos de materiais são desenvolvidos, novas análises de cálculo e de execução das estruturas são propostas e novas teorias são formuladas (GARCIA; GARCIA; MENDES, 2014).

Além disso, algumas soluções construtivas exigem materiais melhorados, com propriedades superiores aos normalmente utilizados. Nesse contexto surgiram os concretos chamados concretos especiais, com diferentes características, que trouxeram algum avanço acerca dos concretos usados na construção civil (GARCIA; GARCIA; MENDES, 2014).

2.2. Geopolímero

Diversas são as pesquisas na área de tecnologia de novos materiais cimentantes, visando conferir maior durabilidade através da melhoria das propriedades químicas, físicas ou mecânicas de pastas aglomerantes. Isso pode ser feito por meio de emprego de aditivos que apresentam comportamento diferenciado em relação ao tradicional cimento Portland, material aglomerante mais empregado no mundo. Uma alternativa ao cimento Portland, amplamente estudada nas últimas décadas, consiste no cimento geopolimérico, que é um cimento polimérico inorgânico, também conhecido como polissialato (SANTOS *et al.*, 2015).

O geopolímero é considerado a terceira geração de aglomerantes, sendo antecedido pela cal e pelo cimento Portland. O termo geopolímero é utilizado para descrever a fase amorfa do álcali aluminossilicato, comumente utilizado para polímeros inorgânicos, cimentos álcali-ativados, geocimentos, hidrocerâmicas, entre outros. Apesar da variada nomenclatura, todos os termos citados descrevem materiais formados utilizando a mesma descrição química (ALLEM, 2016).

Os chamados geopolímeros ou polissialatos, uma nomenclatura adotada para a abreviação de poli-sílico-aluminatos, foram descritos pela primeira vez em patentes 1981, onde são apresentados vários exemplos de mistura de reagentes e processos de obtenção. Os polissialatos apresentam características particulares que revelam o seu grande potencial de aplicação como aglomerante, em substituição ao cimento Portland (DA SILVA *et al.*, 2006).

Para Davidovits (1994), foi a partir de 1978 que o entendimento das condições hidrotérmicas foi possível, a partir da semelhança entre a reação de síntese de plásticos fenólicos e dos minerais feldspatóides e zeólitos. Ambos os processos necessitavam de um pH elevado, meio alcalino e temperaturas abaixo de 150°C. Então, a partir de 1983, Davidovits (1994) iniciou o desenvolvimento de produtos cimentícios utilizando a química dos geopolímeros.

De acordo com Pinto¹ (2004, *apud* ALLEM, 2016), a ativação alcalina também é conhecida como Geopolimerização, termo sugerido por Davidovits (1994) para este tipo de reação, conhecida pela semelhança com a síntese dos polímeros orgânicos por meio de condensação e utilização de materiais cimentícios suplementares.

Os aluminosilicatos foram as matérias-primas utilizadas, também chamadas de materiais precursores, sendo por isso natural que a nomenclatura proposta traduzisse essa origem. O termo polissialato foi introduzido para caracterizar a rede de tetraedros de SiO₄ e AlO₄ que, ligados alternadamente e compartilhando todos os oxigênios dos vértices, constituem a matriz química dos geopolímeros (ALLEM, 2016).

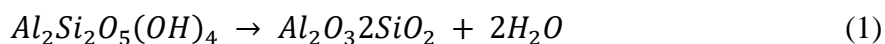
O uso de argamassas e concretos contendo polímeros vêm sendo largamente ampliado nos países industrialmente desenvolvidos, com efeitos benéficos para a melhoria da qualidade e do desempenho das construções de um modo geral. Hoje, ainda são escassos os cimentos geopoliméricos disponíveis no mercado, bem como também os estudos que esclareçam as propriedades dos mesmos. No mercado nacional pode ser encontrado o cimento GP, comercializado pela *Wincret Designer Concrete Products Ltda.* (FERREIRA, 2001; GONÇALVES *et al.*, 2016).

2.2.1. Metacaulim

O metacaulim, material escolhido como matéria-prima do geopolímero nesse estudo, é um material pozolânico, obtido através da desidroxilação da argila caulinítica pela calcinação, em temperaturas na faixa de 500 a 800 °C. Este material vem sendo bastante utilizado na construção civil como adição em concretos de alta resistência, porém, devido seu alto teor dos

¹ PINTO, A. T. Sistemas Ligantes Obtidos Por Ativação Alcalina do Metacaulino. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2004.

óxidos de silício e alumínio, ele também funciona como precursor do geopolímero. O processo de desidroxilação da caulinita é mostrado pela Equação 1 a seguir:



O uso de metacaulim tornou-se abundante em concretos com resistências acima de 40 MPa, concretos expostos em ambientes agressivos e ainda em concretos de alta performance. O uso deste material reduz o tamanho dos poros na pasta cimentícia e transforma partículas finas em poros descontínuos, reduzindo assim a permeabilidade do concreto substancialmente além de aumentar a resistência à flexão e compressão, reduz permeabilidade a água e eflorescência. O metacaulim também reduz o calor de hidratação controlando melhor a fissuração (ALLEM, 2016).

O material cru, utilizado no processo de produção do metacaulim é a argila caulínica. A caulinita é formada por folhas tetraédricas de sílica e folhas octaédricas de gipsita (onde o íon coordenado é o alumínio). A desidroxilação do caulim, material mostrado na Figura 2, provoca alterações estruturais na caulinita, em particular na coordenação dos átomos de alumínio. Devido ao efeito da temperatura, as hidroxilas OH, situadas no centro de cada octaedro, unem-se de duas em duas, liberando uma molécula de água e em seu lugar resta uma molécula de oxigênio. Desta forma a estrutura semicristalina da caulinita é quebrada facilitando a reação de ativação alcalina (ALLEM, 2016; DAVIDOVITS, 2008).

Figura 2 - Caulim.



Fonte: Wikipedia².

² Disponível em: < <https://pt.wikipedia.org/wiki/Caulim>>. Acesso em: 14 de out. de 2018.

2.2.2. Química dos geopolímeros

Os geopolímeros podem ser definidos como polímeros inorgânicos em que tetraedros de SiO_4^{4-} e AlO_4^{5+} formam uma rede tridimensional ao se ligarem pelo compartilhamento de todos os seus átomos de oxigênio, devendo essa rede ser estabilizada pela presença de cátions monovalentes tais como Na_+ e K_+ (BITENCOURT *et al.*, 2012).

Aredes, Klein e Pawlik³ (2012, *apud* ALLEM, 2016), mostram que a geopolimerização se inicia com a dissolução da sílica e alumina em uma superfície de partículas não solúveis, posteriormente estas partículas formam um gel como resultado da reação e geram uma estrutura geopolimérica resistente.

Outro elemento que influencia as propriedades dos geopolímeros é o cálcio. Estudos realizados por Temuujin *et al.*⁴ (2009, *apud* MAZZA, 2010) sobre a influência do cálcio na geopolimerização mostram que compostos desse elemento químico (CaO e Ca(OH)_2) melhoram as propriedades mecânicas dos geopolímeros quando curados à temperatura ambiente.

O concreto geopolimérico pode utilizar como matéria-prima qualquer material inorgânico constituído por sílica e alumina e que tenha sido sujeito a um tratamento térmico que torne o material amorfo. Os estudos de Joseph Davidovits recomendam, no entanto, que se respeitem determinadas proporções atômicas, para se obterem resultados ótimos tanto a nível mecânico quanto em função da durabilidade. Desta forma, podem ser utilizadas como matérias-primas para os ligantes geopoliméricos, cinzas, escórias, ou até mesmo resíduos de minas e pedreiras, mesmo contendo metais alcalinos (ALLEM, 2016). A Figura 3 mostra as relações molares indicadas por Davidovits em seus estudos.

Figura 3 - Relações molares entre óxidos na mistura dos reagentes.

$(\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O})/\text{SiO}_2$	0,20 a 0,28
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	3,5 a 4,5
$\text{H}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O})$	15,0 a 17,5
$(\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$	0,8 a 1,2

Fonte: Davidovits (1982).

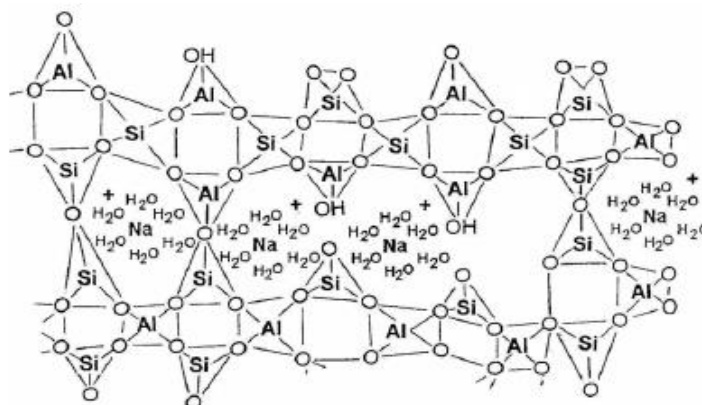
³ AREDES, S.; KLEIN, B.; PAWLIK, M.. The removal of arsenic from water using natural iron oxide minerals. *Journal Of Cleaner Production*, [s.l.], v. 29-30, p.208-213, jul. 2012.

⁴ TEMUJIN, J.; VAN RIESSEN, A.; WILLIAMS, R. Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes – *Journal of Hazardous Materials*. 2009.

O geopolímeros obtém suas melhores propriedades mecânicas quando sua formulação permite que as razões molares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{M}_2\text{O}$ atinjam valores em torno de 3,8 e 1,0, respectivamente (com M_2O representando a somatória dos teores dos óxidos alcalinos K_2O e Na_2O) (BITENCOURT *et al.*, 2012).

Dessa forma, na geopolimerização, os ânions tetraédricos de SiO_4 e AlO_4 vão, alternadamente, ligar-se, compartilhando todos os oxigênios dos vértices, transformando-se numa estrutura espacial. Os catalisadores alcalinos NaOH ou KOH , possibilitam a reação entre os componentes minerais, proporcionando aproximação e conseqüente empacotamento. A Figura 4 mostra a estrutura das ligações químicas no processo de geopolimerização (ALLEM, 2016).

Figura 4 - Estrutura das ligações químicas no geopolímero (Na-Polissialato)



Fonte: Davidovits⁵ (1988, *apud* MAZZA, 2010).

Da Silva *et al.* (2006) contextualiza sobre as diferentes funções da água na matriz de cimento Portland e no geopolímero. Sendo a água responsável pelo desenvolvimento lento e contínuo de resistência no concreto convencional, por meio do processo de hidratação, e evitando fissuração por evaporação, ela deve estar presente no ambiente do material desde as primeiras idades, fazendo com que o processo de cura úmido seja de suma importância para a qualidade do produto endurecido. Nos polissialatos, a água funciona principalmente como dispersante, meio de condução iônica e catalisadora da geopolimerização, podendo posteriormente deixar ou não a molécula, sendo eliminada por aquecimento, e desde que a polimerização esteja completa não haverá prejuízo na resistência do material. Isto faz com

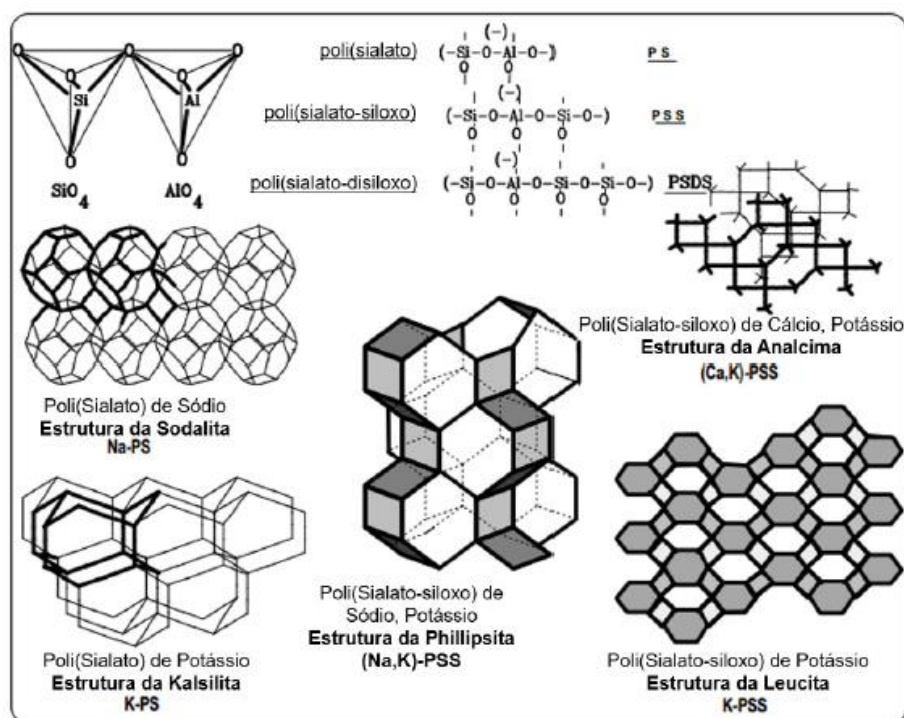
⁵ DAVIDOVITS, J. Geopolymer Chemistry and Properties, Proceedings of the First European Conference on Soft Mineralogy, J. Davidovits and J. Orlinsl, eds., V. 1, The Geopolymer Institute, Compiègne, France, 1988. pp. 25-48.

que a cura dos geopolímeros seja menos crítica, dispensando a cura úmida utilizada em concretos convencionais e possibilitando uma cura em condições ambientes.

De acordo com Aredes, Klein e Pawlik⁶ (2012, *apud* ALLEM, 2016), mesmo havendo boa cura do material à temperatura ambiente e atingindo níveis aceitáveis de resistência à compressão, a temperatura ideal de cura seria de 65 °C, por aproximadamente 1 hora, obtendo uma maior capacidade de resistência à compressão do material.

Diversos tipos de geopolímeros podem ser formados de acordo com a relação atômica Si/Al ou a substância ativadora utilizada. Por exemplo, as relações de Si/Al de 1, 2 e 3 definem o poli(sialato), poli(sialato-siloxo) e o poli(sialato-disiloxo), respectivamente. Além disso, as soluções ativadoras mais utilizadas são compostas de Sódio (Na), Cálcio (Ca) e Potássio (K). A Figura 5 mostra alguns tipos dos geopolímeros citados.

Figura 5 - Estrutura molecular de alguns geopolímeros.



Fonte: Adaptado de Davidovits (1991).

2.2.3. Características gerais

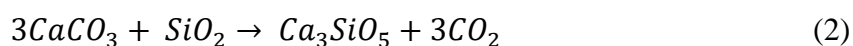
As propriedades dos geopolímeros podem ser muito similares, ou até mesmo superiores, às de alguns materiais cerâmicos, no que se incluem as cerâmicas vermelhas, cimentos, concretos, entre outros. No entanto, o maior diferencial dos geopolímeros em

⁶ AREDES, S.; KLEIN, B.; PAWLIK, M.. The removal of arsenic from water using natural iron oxide minerals. *Journal Of Cleaner Production*, [s.l.], v. 29-30, p.208-213, jul. 2012.

relação aos produtos convencionais estaria em seus aspectos quanto à sustentabilidade, pois os processos de geopolimerização poderiam ser energeticamente menos intensivos (em comparação ao processo de produção do cimento Portland, por exemplo) e, principalmente, poderiam fazer uso de resíduos industriais na sua sintetização (BITENCOURT *et al.*, 2012).

Também chamados de polímeros inorgânicos, esses materiais possuem vantagens ecológicas e físico-químicas quando comparados ao cimento Portland. As vantagens ecológicas se tornaram evidentes com a possibilidade de serem produzidos à temperatura ambiente (ou até 80 °C) sem aparente liberação de CO₂ na atmosfera. As características físico-químicas garantem propriedades especiais, tais como rápido desenvolvimento de resistência mecânica e excelente durabilidade química (BORGES *et al.*, 2014).

A fabricação do clínquer de cimento Portland é realizada a partir da calcinação, com temperatura média de 1350 °C, do calcário e de sílica de acordo com a Equação 2:



De acordo com Torgal, Castro-Gomes e Jalali (2005), na produção de 1 tonelada de cimento Portland, precisa-se de 1,5 tonelada de calcário, e é gerado diretamente 0,55 tonelada de dióxido de carbono (CO₂) e, 0,39 tonelada de CO₂, referente a queima de combustíveis fósseis. Resultando numa liberação de aproximadamente 0,94 tonelada de CO₂ para cada tonelada de cimento Portland fabricado. É estimado ainda que a produção de cimento é responsável por cerca de 5% das emissões globais de CO₂, evidenciando o impacto da atividade ao meio ambiente e a importância da busca por técnicas construtivas mais ecológicas.

O cimento geopolimérico pode apresentar propriedades superiores ao do cimento Portland utilizando menores temperaturas de calcinação, 600 a 900 °C para o geopolímeros contra cerca de 1300 °C para o cimento Portland, e ainda possui menores emissões de CO₂. Além disso, a vida útil de concretos feitos com pasta geopolimérica é mais duradoura que os concretos de cimento Portland, dada a sua inércia e durabilidade química, possibilitando a utilização do geopolímeros no tratamento de metais pesados, tóxicos ou radioativos, através da encapsulação desses materiais (MAZZA, 2010).

Para exemplificar a ordem de grandeza da durabilidade que pode se obter com o polissialato, Da Silva *et al.* (2006) mostra que o processo utilizado na obtenção dos

geopolímeros é semelhante à processos de estabilização de solos cauliníticos ou lateríticos com cal $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, feita pelos antigos Romanos e Egípcios na confecção de aglomerantes estruturais. Compostos que caracterizam os geopolímeros também são encontrados em estruturas antigas da Grécia, Chipre e Itália, em que algumas estruturas já contabilizam 9000 anos de idade. A Figura 6 traz algumas estruturas com presença de geopolímeros.

Figura 6 - Estruturas com geopolímero. (a) O Coliseu de Roma, com 1938 anos de idade (b) Acrópole de Atenas, com cerca de 2468 anos de idade.



(a)



(b)

Fonte: (a) Wikipedia⁷ (b) Site Cultura Mix⁸.

Além disso, resultados de estudos mineralógicos e químicos mostram que as grandes pirâmides do Egito, mostradas na Figura 7, foram erguidas, há 4500 anos, com blocos moldados com material geopolimérico. Constatou-se que os blocos não eram de pedra calcária natural e sim de um concreto fabricado a partir de pedregulhos de calcário cauliníticos com NaOH, produzida *in loco* com a mistura de cal $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, barrilha $[\text{Na}_2\text{CO}_3]$ e água (DA SILVA *et al.*, 2006).

Figura 7 - Pirâmides do Egito.



Fonte: Wikipedia⁹.

⁷ Disponível em: < <https://pt.wikipedia.org/wiki/Coliseu>>. Acesso em: 30 set. de 2018.

⁸ Disponível em: < <http://turismo.culturamix.com/atracoes-turisticas/acropole-de-atenas>>. Acesso em: 30 set. de 2018.

A resistência mecânica dos geopolímeros pode atingir níveis muito superiores aos dos materiais de cimento Portland. Vogado *et al.* (2014) fabricou uma argamassa geopolimérica de ultra alto desempenho para o estudo da resistência à corrosão desse tipo de material e conseguiu uma resistência média de 186 MPa. Além disso, nos testes realizados pelos autores com ácido sulfúrico, apesar da queda de resistência (19% em 14 dias de imersão no ácido) devido à camada de corrosão, não foi notada fissuração significativa nos corpos de prova, diferentemente do que ocorre com materiais de cimento Portland em contato com materiais corrosivos, tornando mais lento o efeito do ácido no geopolímero. Tal resultado corrobora com o caráter da durabilidade química dos polissialatos.

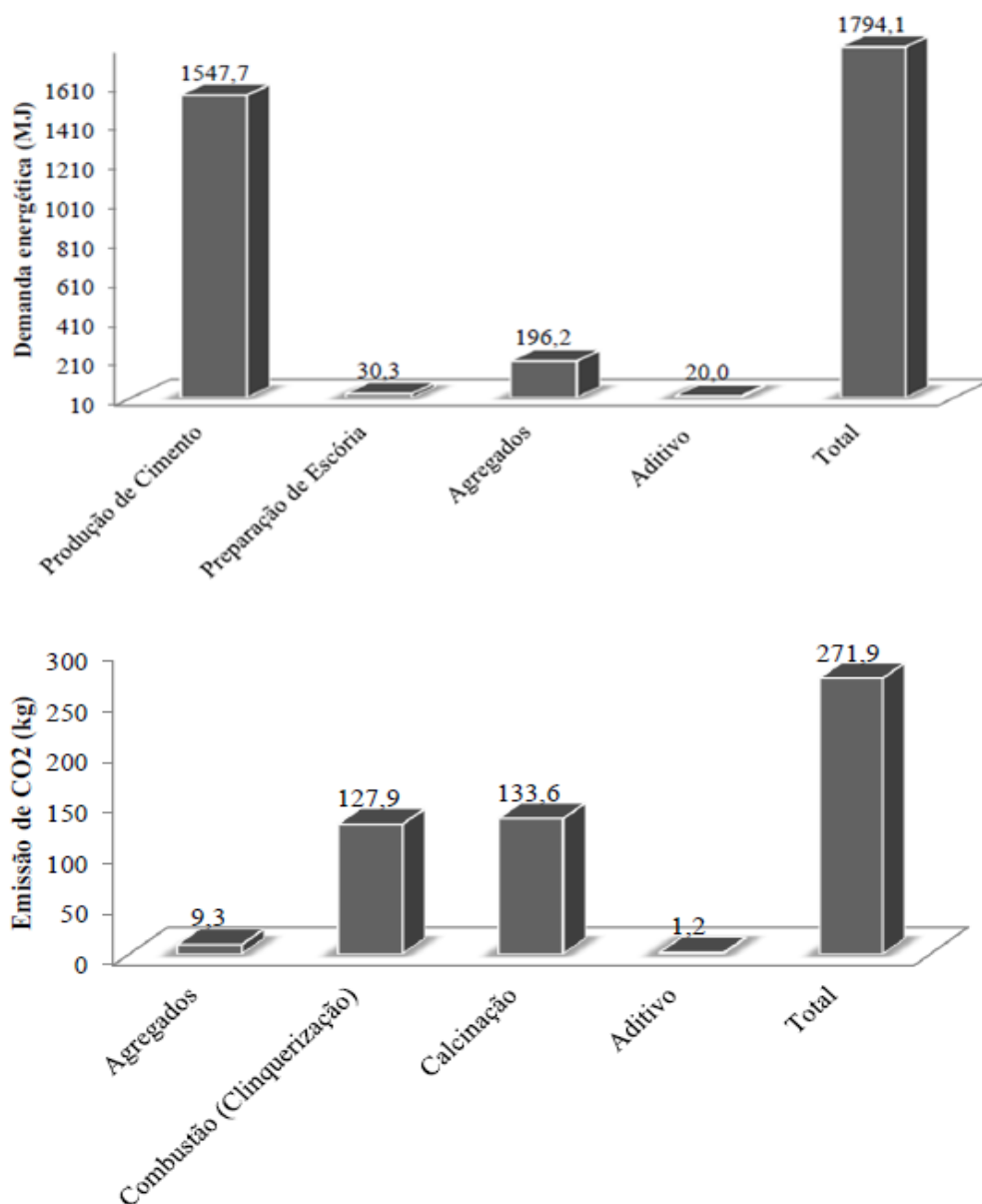
Outras vantagens da matriz geopolimérica são evidenciadas a partir de diversos estudos. Davidovits (1994) traz o resultado do ensaio para reações álcali-agregado tanto no geopolímero quanto no cimento Portland tradicional e comprova uma variação de volume praticamente nula nos geopolímeros, obtendo como valor máximo uma contração de 0,2 mm/m, já o cimento Portland obtém uma expansão de quase 1,6 mm/m, uma alteração no volume oito vezes maior. Tendo em vista as consequências e o difícil manejo nas estruturas afetadas pela patologia, que geralmente ocorre em locais com maior exposição à umidade como pontes, barragens, fundações de edifícios, é de grande interesse a utilização e o estudo de materiais menos suscetíveis a esse tipo de dano.

A resistência às altas temperaturas e ao ciclo de gelo e degelo são outras qualidades do material geopolimérico. Em ensaios feitos com diferentes tipos de geopolímeros, não foi notada nenhuma ruptura ou deformação nos corpos de prova após 25 ciclos de gelo e degelo, ocorrendo perda de massa num intervalo de 4,11% até 22,90%, enquanto a resistência à compressão residual ficou na faixa de 26,12% até 100,00%. Ainda se investigou a perda de massa e a resistência à compressão residual após a exposição do material em altas temperaturas (300 °C, 600 °C e 900 °C) e como resultado obteve valores de perda de massa entre 1,00% e 7,46% e uma resistência à compressão residual no intervalo aproximado entre 22% e 97% (DEGIRMENCI, 2018). Além disso, os polissialatos normalmente têm baixa porosidade aparente ou nanoporosidade, resultando numa permeabilidade de água muito baixa, na ordem de 10^{-9} até 10^{-12} cm/s (GIANNOPOULOU; PANIAS, 2007).

⁹ Disponível em: < https://pt.wikipedia.org/wiki/Pir%C3%A2mides_eg%C3%ADpcias>. Acesso em: 30 set. de 2018

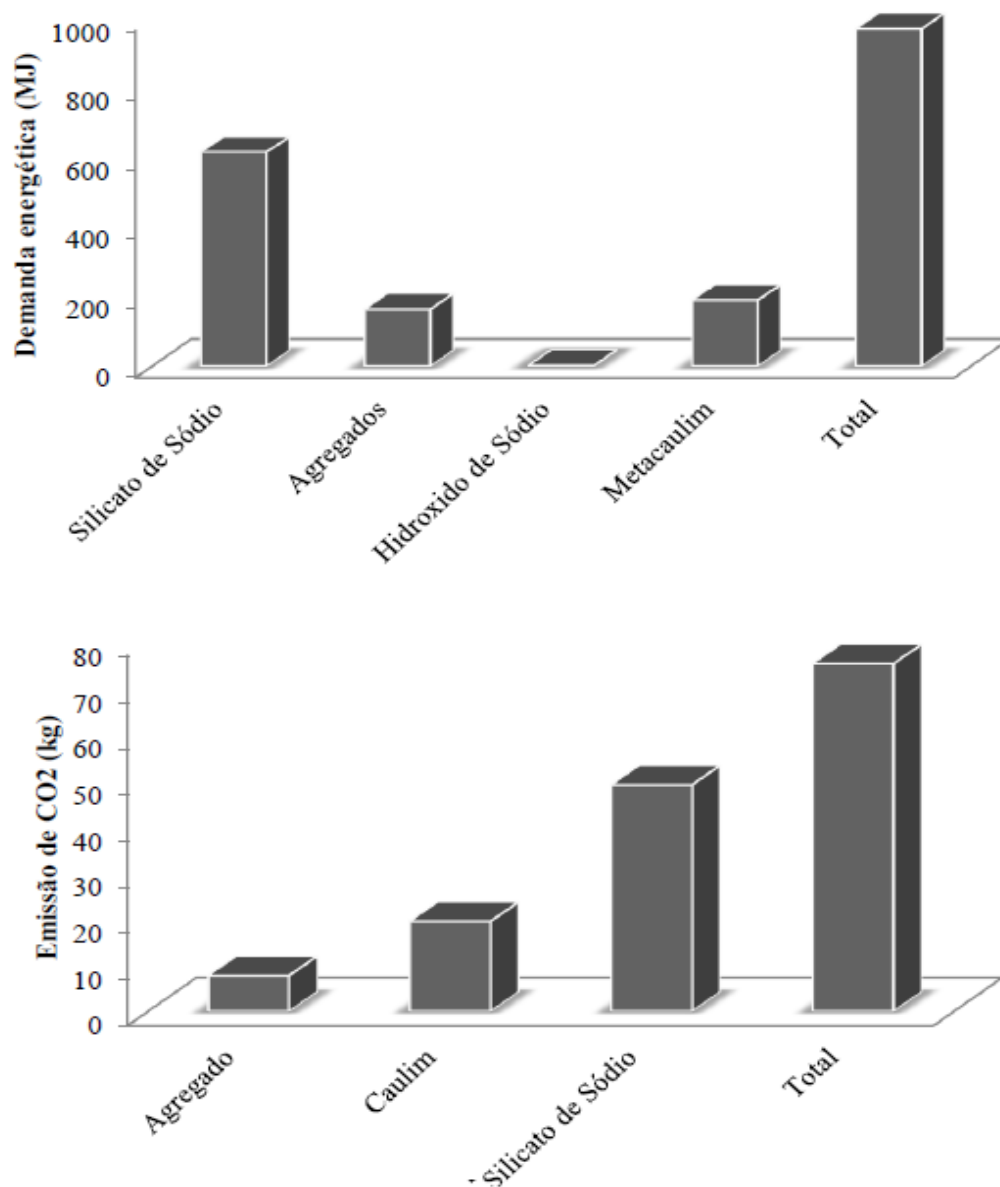
Sobre questões ambientais, Borges *et al.* (2014) utilizou uma análise comparativa entre o ciclo de vida do concreto geopolimérico e o de cimento Portland tradicional para verificar a diferença da sustentabilidade entre os materiais, englobando todo o processo de produção, desde o beneficiamento das matérias-primas até a mistura final. Concluiu-se que a utilização do concreto geopolimérico permite reduzir a demanda energética em 45,8% e a emissão de CO₂ em 72,4% em relação ao concreto convencional, tornando o polissialato um material bastante atraente no sentido ecológico, principalmente com a crescente preocupação com a sustentabilidade e os danos causados ao meio ambiente em todo o planeta devido à atividade humana. As Figuras 8 e 9 ilustram os resultados obtidos pelo autor.

Figura 8 - Demanda energética e emissão de CO₂ no ciclo de vida do concreto de cimento Portland.



Fonte: Borges *et al.* (2014).

Figura 9 - Demanda energética e emissão de CO₂ no ciclo de vida do concreto geopolimérico.



Fonte: Borges *et al.* (2014).

2.2.4. Materiais alternativos como matéria-prima

Outra perspectiva no estudo dos geopolímeros é o uso de resíduos industriais, que muitas vezes seriam descartados ou subutilizados, como matéria-prima na composição do seu traço. Na pesquisa de Bitencourt *et al.* (2012), por exemplo, o autor mostra que devido ao aumento do resíduo de bauxita e a necessidade de se promover cada vez mais a sustentabilidade do meio industrial, é importante investigar o uso da técnica da

geopolimerização como ferramenta para conter tal resíduo na forma de um sólido coeso, com propriedades que lhe permitam agregar valor.

Geraldo *et al.* (2017) produziu um geopolímero utilizando metacaulim, cinza da casca de arroz e resíduos de cerâmica vermelha e obteve um material com resistência à compressão de 11 MPa após 1 dia de cura, valor superior ao padrão brasileiro para blocos de solo-cimento ou cerâmicos não estruturais, e de 22 MPa após 90 dias. O estudo mostra que é possível a utilização do geopolímero na construção civil, e que a composição do traço pode ser refinada para atingir níveis maiores de resistência variando a relação Si/Al.

Torgal, Castro-Gomes e Jalali (2005) avaliou a utilização de resíduo da mineração de tungstênio como material precursor do geopolímero e obteve uma resistência à compressão de até 40 MPa em 28 dias. Enquanto Hawa, Tonnyopas e Prachasaree (2013) utilizou cinza do óleo de palma para substituir parte do metacaulim utilizado como aglomerante (0, 5, 10 e 15% da massa do metacaulim) e obteve misturas com resistência à compressão na faixa de 45 a 70 MPa. Mostrando que, através da ativação alcalina em geopolímeros, pode se obter resistências maiores que as do concreto convencional utilizando de materiais alternativos.

O trabalho realizado por D'Aguiar (2012) buscou a formulação de um geopolímero com materiais residuais do ambiente, reduzindo o impacto ambiental da utilização de matérias-primas não renováveis, de forma que foram utilizados resíduos de scheelita, pó de vidro e cascas de ovos. O resíduo de scheelita se colocou como substituto do metacaulim, sendo utilizado como precursor devido seus teores de sílica e alumina; o pó de vidro, obtido de lâmpadas fluorescentes, foi utilizado como fonte extra de sílica devido sua natureza amorfa e alta concentração química do material; e, por fim, as cascas de ovos foram calcinadas para se obter hidróxido de cálcio, que pode ser utilizado como ativador alcalino. No final do estudo, concluiu-se que os materiais têm potencialidade para substituir as matérias-primas convencionais, reduzindo ainda mais o dano ambiental causado pelo geopolímero.

Dessa forma, abre-se um grande leque de possibilidades para o reaproveitamento de resíduos, reduzindo inclusive o impacto ambiental de atividades externas à síntese do geopolímero em si. De um modo geral, todos os materiais contendo sistemas de aluminossilicatos (desde resíduos de construção, escórias, cinzas volantes, pozolanas, até materiais puros como a argila, a caulinita ou o metacaulim) podem ser sujeitos a processos de geopolimerização (ALLEM, 2016).

2.2.5. Propriedades dinâmicas dos geopolímeros

Os módulos elásticos são parâmetros fundamentais para a engenharia e aplicação de materiais, já que estão relacionados à descrição de várias outras propriedades mecânicas, como por exemplo, a tensão de escoamento, a tensão de ruptura, a variação de temperatura crítica para a propagação de trincas sob a ação de choque térmico, entre outras. (CARRASCO *et al.*, 2017).

Carrasco *et al.* (2017), ainda descreve que os módulos de elasticidades são intrínsecos ao material e dependem da sua composição química, microestrutura, porosidade e defeitos. Os módulos elásticos podem ser determinados por métodos quase-estáticos, métodos dinâmicos e ultrassom, de modo que os valores determinados pelos métodos dinâmicos são maiores que os valores pelos estáticos.

Segundo Pelisser *et al.* (2018), que avaliou uma matriz geopolimérica à base de metacaulim, o valor médio de módulo de elasticidade obtido via estática foi de 26,1 GPa e uma resistência à compressão aos 28 dias de 55,1 MPa. Como referência, o autor utilizou um concreto de cimento Portland que apresentou módulo de elasticidade médio de 48,1 GPa e uma resistência à compressão aos 28 dias de 50,6 MPa. O baixo valor do módulo de elasticidade, quando comparado ao do cimento Portland, é característico do material geopolimérico, sendo influenciado pelo tipo de ligação química de acordo com a razão Si/Al.

Barraza (2016), estudou adição de nanobastões de SiC em matriz geopolimérica e chegou a um resultado para o módulo elástico dinâmico de até 2,40 GPa, para matrizes com adição, e de até 5,36 GPa para matrizes sem adição. A resistência à compressão máxima dos corpos de prova estudados nesse trabalho foi de aproximadamente 15,5 MPa. O autor ainda salientou que, como já foi comentado, os módulos dinâmicos sempre são maiores que os estáticos, além disso, que a redução de água na produção da matriz contribui ao incremento de módulo e que a adição de nanomaterial só induz ao incremento quando o método de cálculo do módulo é pela aplicação de carga, ali o material estaria oferecendo suas propriedades em lugar de ser visto como descontinuidade da matriz nos métodos não destrutivos.

Kirschner; Harmuth (2004), aplicou o método de frequência de ressonância para determinação do módulo dinâmico em uma matriz geopolimérica a base de metacaulim, hidróxido de sódio e silicato de sódio com idade de 28 dias, obteve valores entre 7,19 a 7,62 GPa, e teve a resistência à compressão variando entre 29,4 e 39,8 MPa.

De acordo com Mazza (2010), alguns autores consideram a granulometria (finura) do agregado como o componente mais importante e influente na determinação dessa propriedade. O autor ainda cita em sua análise que pode haver diminuição do módulo elástico com o aumento da razão molar de Si/Al na mistura, pois diferentes relações podem gerar diferentes produtos de hidratação e formação de estruturas diferentes, assim como foi notado por Pelisser *et al.* (2018).

O amortecimento, ou atrito interno, é uma das propriedades mais sensíveis de materiais e estruturas, tanto em escala macro quanto microscópica, sendo particularmente sensível à presença de trincas e microfissuras. É o fenômeno pelo qual a energia mecânica de um sistema é dissipada, principalmente pela geração de calor e/ou energia. Além da aplicação clássica no estudo de metais e em engenharia civil (devido à importância do amortecimento para a integridade de estruturas no caso de abalos sísmicos), a caracterização do amortecimento também vem sendo empregada no estudo de concretos para a avaliação do dano. (COSSOLINO; PEREIRA, 2010).

Segundo Blessmann¹⁰ (2005, *apud* PRADELLA, 2013), em estruturas monolíticas, como as de aço soldadas ou de concreto armado, a parcela dominante do amortecimento é o amortecimento intrínseco do material, que faz parte do amortecimento estrutural.

Pan *et al.* (2012) comparou o valor do amortecimento crítico entre compostos geopoliméricos, com variadas relações entre o silicato de sódio e a soda cáustica, utilizados como solução ativadora, e o concreto de cimento Portland. O estudo resultou em valores bem próximos para a capacidade de amortecimento entre os dois tipos de materiais, ocorrendo uma diferença de 11,5% entre os valores mais próximos, chegando a uma diferença de até 41% entre os valores mais distantes. Além disso, a mudança na relação dos compostos da solução ativadora não descreveu claramente a sua influência no amortecimento crítico do geopolímero, diferentemente da resistência à compressão que acompanhou o crescimento imposto na relação.

Zhu *et al.* (2014) avaliou a capacidade de amortecimento de geopolímeros com base em cinza volante, comparando-a com a do concreto de cimento Portland. O amortecimento crítico médio do geopolímero, comparado ao do cimento Portland, diminuiu cerca de 27%, comportamento notado também em concretos que utilizam agregados reciclados. Apesar do

¹⁰ BLESSMANN, J. Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento. 2. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2005.

decréscimo da capacidade de amortecimento, o autor coloca o amortecimento nos geopolímeros comparável ao do concreto convencional, e cita a baixa umidade presente na matriz geopolimérica como causador do declínio em tal propriedade.

2.2.6. Desafios para a difusão do concreto geopolimérico

O custo do concreto geopolimérico ainda é um fator relevante quando comparado ao concreto de cimento Portland, evidenciando o motivo do material ainda não ser uma alternativa construtiva totalmente viável, problema comum associado às novas tecnologias.

Segundo pesquisas de Torgal, Castro-Gomes e Jalali (2005), o custo por metro cúbico do concreto geopolimérico chega a ser o triplo do valor referente ao concreto de cimento Portland. Essa diferença de preço se reduz quando é analisado o custo por MPa, visto que as propriedades mecânicas dos concretos geopoliméricos são melhores de que as do concreto de cimento Portland comum, mas ainda há uma diferença de custo de 30% a mais do concreto geopolimérico.

A trabalhabilidade da pasta geopolimérica é outra propriedade crítica, sendo notada em algumas referências e no próprio programa experimental da pesquisa proposta nesse trabalho. Como as soluções ativadoras são formadas geralmente pela mistura de silicato de sódio com uma solução alcalina, o aspecto viscoso do silicato é transferido para a pasta, tornando-a pegajosa e dificultando bastante o seu manuseio. Mesmo sem a utilização do silicato, o geopolimerização proporciona uma pega relativamente rápida, comparada ao concreto convencional, podendo comprometer o uso da pasta caso ocorra demora na aplicação.

Outro aspecto negativo é que o uso do concreto geopolimérico ainda carece de normatização específica que garanta a correta aplicação para garantia da resistência mecânica e durabilidade. A normalização é importante até mesmo para garantir a segurança dos envolvidos no processo, haja vista que as soluções empregadas na produção do geopolímero são alcalinas e, portanto, podem provocar queimaduras na pele dos operários, enquanto o concreto se encontra no estado fresco (mistura, lançamento do concreto) (ALLEM, 2016).

2.3. Evidências extraídas do referencial teórico

Tem-se colocado o aglomerante geopolimérico como um dos principais substitutos do cimento Portland, extremamente utilizado na indústria da construção civil, seja por melhores propriedades, ou seja, por apresentar um contexto menos abusivo ao meio ambiente. O estudo, então, busca avaliar a possibilidade de entrada do concreto geopolimérico no mercado, em detrimento do concreto convencional, a partir da análise de propriedades dinâmicas, da resistência do material e do seu preço.

A resistência à compressão é um dos principais parâmetros do concreto, e, tomando como base os parâmetros para o concreto de cimento Portland, é uma propriedade que apresenta números bastante satisfatórios para os geopolímeros. Temos que o menor valor citado na revisão foi de 11 MPa, e mesmo assim se trata de uma resistência após um dia de cura somente. De acordo com o ABNT NBR 6136/2016, o valor mínimo de resistência para blocos estruturais de concreto do é de 8 MPa, assim, o material geopolimérico já atenderia às demandas de tal produto.

Podemos perceber que os geopolímeros também se enquadram na faixa de resistência para concreto estrutural, regido pela ABNT NBR 6118/2014, a exemplo de Kirschner; Harmuth (2004) que obtiveram geopolímeros com resistência entre 29,4 e 39,8 MPa aos 28 dias. Os geopolímeros podem até ultrapassar o limite dos 50 MPa para a classe convencional de concreto, como foi o caso de Pelisser *et al.* (2018) com 55,1 MPa ou o de Hawa, Tonnayopas e Prachasaree (2013) que obteve resultados de até 70 MPa, adentrando à categoria de concretos de alta resistência, tipo de concreto muito utilizado quando se deseja reduzir seções de elementos estruturais com grandes carregamentos.

Em casos mais específicos, podem também ser produzidos o que Vogado *et al.* (2014) denominou de argamassa de ultra alto desempenho, as quais tem resistência muito superior em relação as mais comuns. No caso estudado, a argamassa geopolimérica produzida, chegou a uma resistência média de 186 MPa, quase dobro do valor máximo para concretos de alta resistência. Nessas ocasiões, devem-se haver cuidados especiais com os insumos empregados, principalmente no precursor do geopolímero, sendo mais complexa sua inserção no grande mercado. Ainda assim, com a evolução das construções, há a possibilidade de que alguma estrutura especial necessite de resistências com tal ordem de grandeza.

Com a crescente preocupação com o meio ambiente e a sustentabilidade do planeta, outra característica que se mostra atrativa ao geopolímero é o menor impacto ambiental

causado em comparação com o cimento Portland. Torgal, Castro-Gomes e Jalali (2005) mostra que, a cada tonelada de cimento produzido, 0,94 tonelada de CO₂ é jogada na atmosfera, de modo que aproximadamente 5% das emissões de gás carbônico do mundo são de responsabilidade das cimenteiras. Borges *et al.* (2014) comprova que a emissão de CO₂ na fabricação do geopolímero chega a ser 72,4% menor que na produção do cimento Portland, além de reduzir em 45,8% da demanda energética, aliviando boa parte do impacto ambiental causado pela utilização desse insumo.

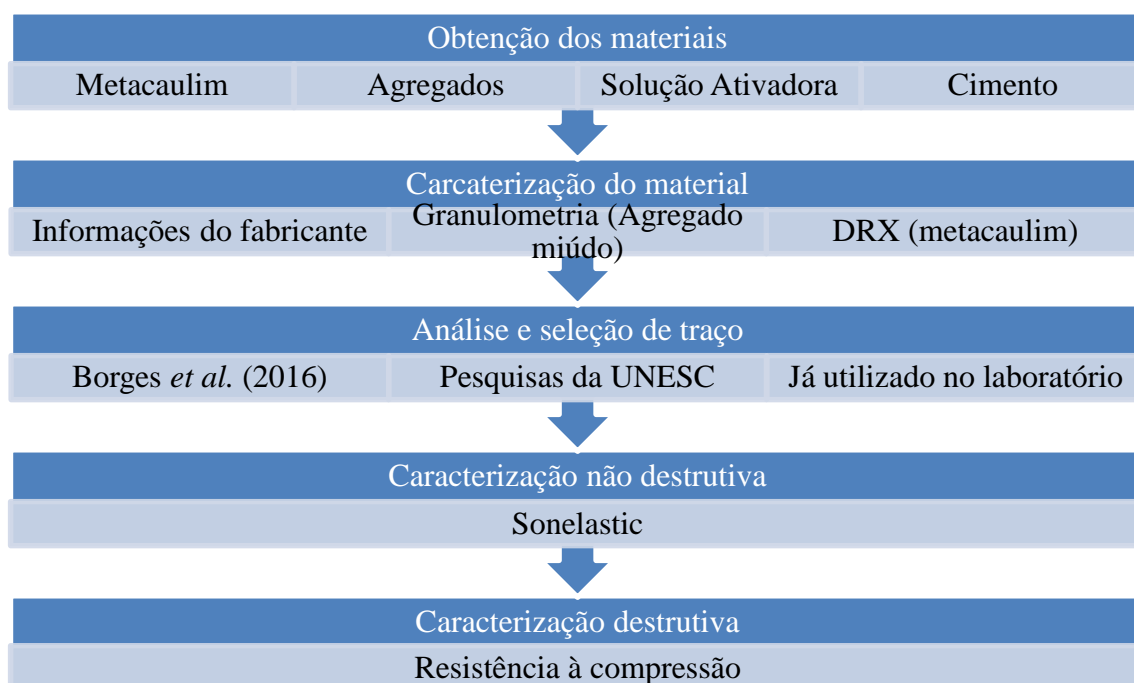
Em relação ao módulo de elasticidade dos geopolímeros, foi notado que, no geral, os valores do módulo são menores em relação ao concreto Portland, resultando numa maior ductilidade nesse material. Como mostrado por Pelisser *et al.* (2018), em que o módulo de elasticidade do geopolímero foi cerca de 45% menor que o do concreto de cimento Portland, mesmo com resistência à compressão semelhante para ambos os materiais. Essa característica pode ser interessante do ponto de vista da segurança, por demonstrar ao ambiente que a ruptura do material está próxima, porém deve se tomar cuidado com os limites de serviço para que não se tenha deformações excessivas, mesmo com a segurança da estrutura garantida.

Os resultados para o parâmetro de amortecimento também foram mais baixos de que os do concreto de cimento Portland, porém de uma forma menos relevante que os resultados para o módulo de elasticidade. Pan *et al.* (2012) e Zhu *et al.* (2014) avaliaram essa propriedade para matrizes geopoliméricas em relação ao concreto convencional, obtendo um decréscimo de 11,5% e 27%, respectivamente, para o amortecimento crítico no geopolímero. Foi citado que a pouca umidade encontrada no polissialato contribui para a diminuição do amortecimento no material, mas que apesar disso, o material pode ser considerado equivalente ao concreto de cimento Portland.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse tópico será detalhada a metodologia adotada para a execução da pesquisa. Inicialmente foi realizada a compra dos materiais necessários para a pesquisa, procurando obter e utilizar as informações do fabricante, sempre que possível, para os produtos adquiridos. Além disso, caracterizou-se o agregado miúdo e o metacaulim através do ensaio de DRX. Alguns traços da literatura foram selecionados para serem avaliados e utilizados na pesquisa com base na sua resistência nas primeiras idades. Com um traço definido, foram realizados os ensaios não destrutivos e destrutivos. A Figura 10 mostra um fluxograma que resume os passos tomados ao longo do trabalho.

Figura 10 - Fluxograma de atividades.



Fonte: Autoria própria (2018).

3.1. Materiais utilizados

No presente estudo foram utilizados produtos adquiridos no comércio, juntamente com as informações disponibilizadas pelos respectivos fabricantes, excetuando-se o metacaulim, o qual, apesar de descrito usando as informações do fabricante, solicitou-se a realização de ensaios para a caracterização do material a fim de garantir a sua natureza como precursor do geopolímero.

3.1.1. Metacaulim

O metacaulim, utilizado na pesquisa como fonte primária de sílica e alumina, é comercializado como Metacaulim HP ULTRA, da empresa METACaulim DO BRASIL, e foi adquirido pelo pesquisador no comércio da cidade de Recife – PE. Para a caracterização do material foi solicitada a realização da difração de raios-x (DRX). O material é mostrado na Figura 11.

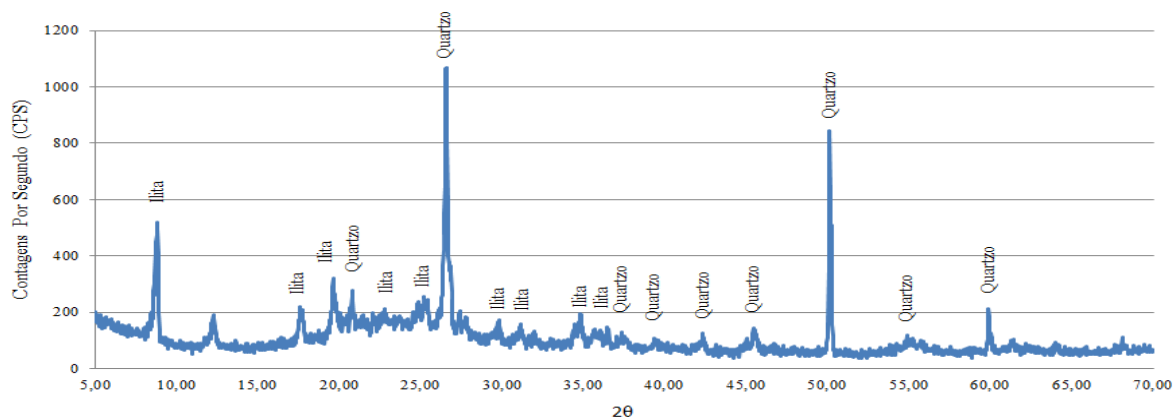
Figura 11 - Metacaulim.



Fonte: Autoria própria (2018).

A interpretação qualitativa dos difratogramas foi feita por comparação com o banco de dados do programa *X'Pert HighScore Plus*. A partir do *score* das fases fornecido pelo programa, que dá uma probabilidade da sua presença no material, percebeu-se a predominância de picos pertencentes à classe dos silicatos, quartzo (SiO_2) e a Ilita [(K, H₃O) Al₂ Si₃ Al O₁₀ (OH)₂], sem a presença de picos de caulinita, indicando uma calcinação eficiente. Além disso, há um halo amorfo, característico de materiais pozolânico, na região entre 15,0° e 35,0°, indicando a presença de material amorfo. Dessa forma, atesta-se a qualidade do material, a Figura 12 ilustra a análise obtida:

Figura 12 - Análise do DRX.



Fonte: Autoria própria (2018).

As propriedades do metacaulim disponibilizadas pelo fabricante se encontram na Figura 13:

Figura 13 - Propriedades do Metacaulim HP ULTRA.

METACULIM HP ULTRA		
Coloração	Creme claro	
Propriedades Físico-Químicas	Valores típicos	Valores limites (NBR 15.894)
SiO ₂	57%	44% a 65%
Al ₂ O ₃	34%	32% a 46%
CaO + MgO	< 0,1%	< 1,5%
SO ₃	< 0,1%	< 1%
Na ₂ O	< 0,1%	< 0,5%
Eq.Alcalino Na ₂ O	< 1,5%	< 1,5%
Fe ₂ O ₃	2%	-
TiO ₂	1,5%	-
Umidade	0,5%	< 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 Brasil¹¹.

3.1.2. Solução Ativadora

A solução ativadora foi concebida com a solução de silicato de sódio (Na₂SiO₃), utilizado como fonte extra de sílica, e hidróxido de sódio (NaOH), meio alcalino necessário para a geopolimerização. No momento da dissolução do hidróxido de sódio na água, ocorre uma elevação na temperatura devido às reações exotérmicas que acontecem no meio, com isso, a solução deve ser elaborada com certa antecedência para que a temperatura volte à condição ambiente e não haja influência nas reações de geopolimerização.

¹¹ Disponível em: <<http://www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html>>. Acesso em: 28 de ago. de 2018.

Ambos os produtos também foram adquiridos pelo autor do estudo na zona comercial de Recife – PE. O hidróxido de sódio, conhecido comercialmente como soda cáustica, foi adquirido em potes de 1 kg, tendo 97% de pureza e na forma de escamas. O silicato de sódio foi comprado em bombonas de 5 litros cada. A Figura 14 ilustra os respectivos produtos.

Figura 14 - (a) Silicato de sódio (b) Hidróxido de sódio.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2018).

As propriedades disponibilizadas pelo fabricante para o silicato de sódio estão expostas na Tabela 1:

Tabela 1 - Propriedades do silicato de sódio.

<u>Determinação</u>	<u>Especificação</u>	<u>Resultado</u>
Estado Físico (25°C)	Líquido	Líquido
Coloração	Amarelado	Amarelado
Alcalinidade - Na ₂ O (%)	16,00 - 19,00	16,13
Sílica - SiO ₂ (%)	33,00 - 38,00	34,20
Sólidos Totais (%)	50,00 - 57,00	50,33
Água - H ₂ O (%)	-	49,67
Densidade	1,63 - 1,67	1,63

Fonte: Terra Mar Comércio Ltda.

3.1.3. Agregados

Para a sintetização do concreto foram adicionados à pasta geopolimérica agregado graúdo e miúdo, ambos adquiridos no comércio local de material de construção na cidade de

João Pessoa - PB. O agregado miúdo utilizado foi areia natural, similar à utilizada para confecção de concretos convencionais, ilustrada na Figura 15.

Figura 15 - Agregado miúdo.



Fonte: Autoria própria (2018).

Foi realizado o ensaio de granulometria para a areia utilizada, de acordo com a ABNT NBR 7217/1987. A Tabela 2 mostra o resultado do ensaio citado:

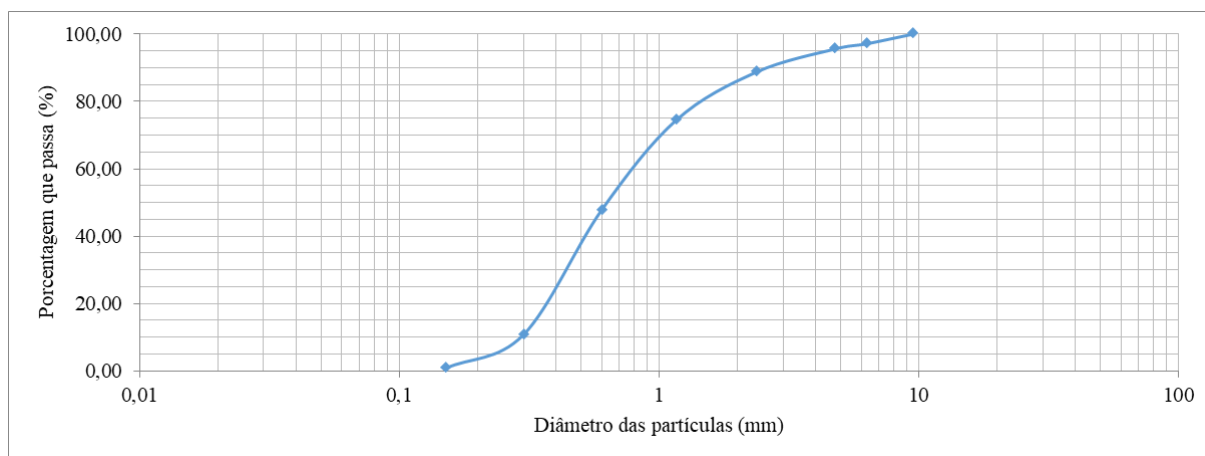
Tabela 2 - Ensaio de granulometria do agregado miúdo.

Areia					
Peneiras (mm)	Peso retido (g)	Peso acumulado retido (g)	Percentagem retida (%)	Percentagem retida acumulada (%)	Percentagem passante acumulada (%)
9,5	15,5	0	1,55	0,00	100,00
6,3	28,6	28,6	2,86	2,86	97,14
4,75	15,5	44,1	1,55	4,41	95,59
2,36	68,9	113	6,89	11,30	88,70
1,16	143,1	256,1	14,30	25,60	74,40
0,6	266,4	522,5	26,63	52,23	47,77
0,3	370,5	893	37,04	89,26	10,74
0,15	99,1	992,1	9,91	99,17	0,83
Resíduo	8,3	1000,4	0,83	100,00	0,00
				Dmax (mm)	4,75
				Módulo de finura	2,82

Fonte: Autoria própria (2018).

A Figura 16 ilustra a distribuição granulométrica da areia:

Figura 16 - Gráfico do ensaio de granulometria do agregado miúdo.



Fonte: Autoria própria (2018).

O agregado graúdo utilizado, mostrado na Figura 17, foi brita granítica nº 1, com diâmetro máximo de 19 mm, também por ser o tipo mais comumente usado em concretos de cimento Portland na região.

Figura 17 - Agregado graúdo.



Fonte: Autoria própria (2018).

3.1.4. Cimento

Foi utilizado o cimento CP II – Z 32, apresentado na Figura 18, da empresa Elizabeth Cimentos, adquirido juntamente aos agregados no comércio da cidade de João Pessoa – PB. O cimento foi utilizado com caráter de adição ao traço para a introdução de óxido de cálcio

(CaO) na pasta geopolimérica. Após a verificação de composições de cimentos semelhantes em outros estudos, percebeu-se que a porcentagem de óxido de cálcio no cimento gira em torno de 55 a 60%, assim, tomou-se o valor de 60% para o nosso estudo. Dessa forma, definiu-se que a relação molar SiO_2/CaO do traço ficasse em torno de 0,15, baseado nos resultados obtidos por Ribeiro (2012).

Figura 18 - Cimento CP II - Z 32.



Fonte: Autoria própria (2018).

3.2. Composição do traço

Por se tratar de uma pesquisa exploratória, não foi possível se aprofundar na elaboração de um traço, de modo que foram testados traços disponíveis na literatura e em pesquisas com geopolímeros já realizadas no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LABEME), na UFPB, tendo escolhido o que obteve melhor desempenho no tocante a resistência à compressão nas primeiras idades.

Para os traços adaptados da literatura, as relações entre os agregados e o metacaulim foram mantidas e a solução ativadora foi definida de modo a atingir as relações molares ótimas mostradas por Davidovits (1982). O traço com base na pesquisa realizada no laboratório foi modificado pela adição do teor de cimento definido na pesquisa e pela utilização de um pouco mais de água para melhorar a trabalhabilidade e mistura do material. A Tabela 3 apresenta os traços em massa testados:

Tabela 3 - Traços unitários em massa avaliados.

Traço	Metacaulim (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Silicato (kg)	NaOH (kg)	H ₂ O (kg)	Cimento (kg)	Resistência (MPa)
1	1,000	1,730	2,480	1,150	0,250	0,625	0,000	2,5 a 5
2	1,000	1,730	2,480	1,350	0,270	0,300	0,000	2,5 a 6
3	1,000	3,360	4,820	1,350	0,270	0,300	0,000	2,5 a 6
4	1,000	3,800	1,200	1,250	0,180	0,380	0,000	5 a 10
5	1,000	3,800	1,200	1,250	0,180	0,380	0,150	13,5
6	1,000	0,830	1,710	0,920	0,080	0,066	0,200	20,5

Fonte: Autoria própria (2018).

O 1º, 2º e 3º traço foi adaptado de Borges *et al.* (2014), o 4º e o 5º baseados em trabalhos consultados da Universidade do Extremo Sul Catarinense e o 6º é o traço já utilizado no LABEME. Como pode ser observado, o 6º traço obteve maior resistência e foi o escolhido para o estudo.

3.3. Caracterização não destrutiva

O ensaio de caracterização não destrutiva foi realizado para aferir o módulo elástico e o amortecimento do material. Para isso, foi utilizado o equipamento Sonelastic[®], exibido na Figura 19, que determina tais propriedades através do método de excitação por impulso. As soluções do equipamento estão de acordo com as normas ASTM E 1876:2007, ASTM C 1259:1998, ASTM C 215:2008 e correlatas, podendo ser utilizada para vários tipos de materiais.

No ensaio, o corpo de prova é posicionado, de acordo com seus parâmetros volumétricos, nas linhas de apoio do equipamento, então o microfone é colocado próximo a uma de suas extremidades e um impulso é provocado, utilizando um pulsador próprio, na extremidade contrária, com a captação do microfone, o *software* obtém as propriedades dinâmicas pretendidas. Para o ensaio, cada corpo de prova foi codificado de CP, pesado e numerado, sendo realizada de uma a três repetições do impulso.

Figura 19 - Ensaio não destrutivo na Sonelastic®.



Fonte: Autoria própria (2018).

3.4. Caracterização destrutiva

A caracterização destrutiva do material dá-se com a execução do ensaio de resistência à compressão foi baseada na ABNT NBR 5739/2018, com pequenas adaptações para o material geopolimérico. O ensaio foi realizado numa prensa digital específica, da marca PAVITEST fabricada pela CONTENCO – INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA, calibrada pelo LabMetrol da UFRN.

O ensaio ocorre posicionando o corpo de prova numa prensa, de modo que a máquina irá exercer uma força gradual de compressão sobre o material até que o mesmo venha a se romper, então, tomada a força máxima obtida no ensaio e com os parâmetros volumétricos do corpo de prova, podemos quantificar a tensão máxima suportada pelo material. O ensaio também foi realizado no LABEME e utilizou os mesmos corpos de prova da caracterização não destrutiva. A Figura 20 ilustra o ambiente de ensaio.

Figura 20 - Ensaio de resistência à compressão.



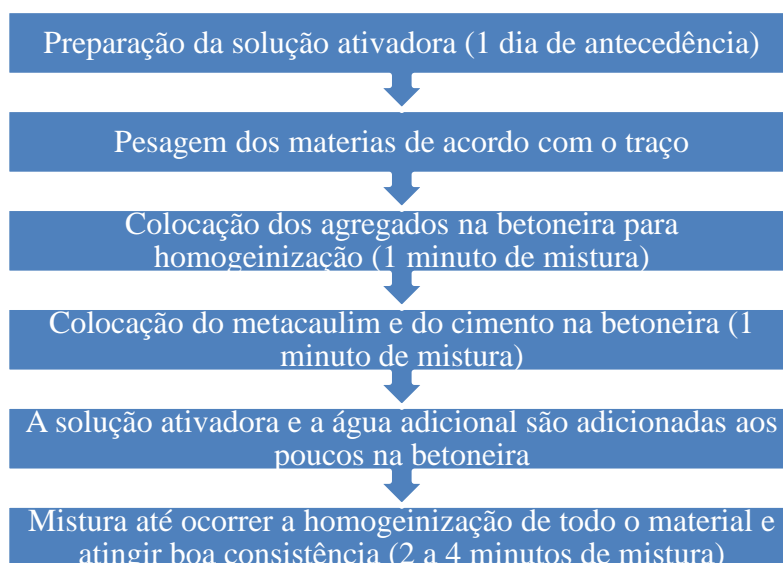
Fonte: Aatoria própria (2018).

3.5. Corpos de prova

Visto que um mínimo de 4 corpos de prova são necessários para o ensaio de resistência à compressão e pelo menos 5 corpos de prova para o ensaio de módulo elástico dinâmico, juntamente com a disponibilidade de material, foi definido um total de vinte e oito corpos de prova a serem testados nas idades de 1, 3, 7 e 14 dias, sendo divididos igualmente em 7 por idade. Os corpos de prova foram moldados com base na ABNT NBR 5738/2003, utilizando fôrmas cilíndricas, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, previamente impregnadas com desmoldante.

Para a execução do concreto foi utilizada uma betoneira de 150 litros do LABEME e o processo seguiu as etapas mostradas no fluxograma da Figura 21:

Figura 21 - Fluxograma para preparação do concreto geopolimérico.



Fonte: Aatoria própria (2018).

Terminada a mistura, o concreto é retirado totalmente da betoneira e direcionado nas fôrmas previamente preparadas para o recebimento do material, adensado manualmente em camadas com auxílio de um soquete, rasou-se o topo do corpo de prova e então coloca-se uma camada de plástico filme, como uma tampa, de modo a evitar a perda de água. Os corpos de prova são desmoldados após um dia e envolvidos totalmente com plástico filme durante mais três dias, como mostrado na Figura 22, com a mesma finalidade de não permitir a saída de água. Após esse período, o plástico filme é retirado e os corpos de prova permanecem em cura nas condições ambientes do laboratório até a data dos ensaios.

Figura 22 - (a) Molde e corpo de prova (b) Uso do plástico filme.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2018).

3.6. Comparativo de custo

Para a análise de custo, serão utilizados os preços obtidos do mercado pelo próprio autor no momento da aquisição dos produtos. Neste trabalho, o preço dos agregados não será levado em consideração, visto que, a principal mudança entre o concreto convencional e o geopolimérico é o tipo de material ligante utilizado, sem precisar necessariamente alterar as relações entre os agregados. Vale salientar que concretos geopoliméricos de resistência equivalente aos concretos convencionais podem ser obtidos utilizando uma proporção menor de agregados, nesses casos, apesar do preço do agregado não se mostrar tão expressivo, em relação ao aglomerante, para impor uma discrepância de custo, cabe uma avaliação incluindo tais materiais.

4. RESULTADOS

Com a escolha do traço 6, mostrado na Tabela 3, foram moldados os corpos de prova e devidamente ensaiados nas idades planejadas.

4.1. Resistência à compressão

Os resultados de ensaio à compressão estão apresentados na Tabela 4.

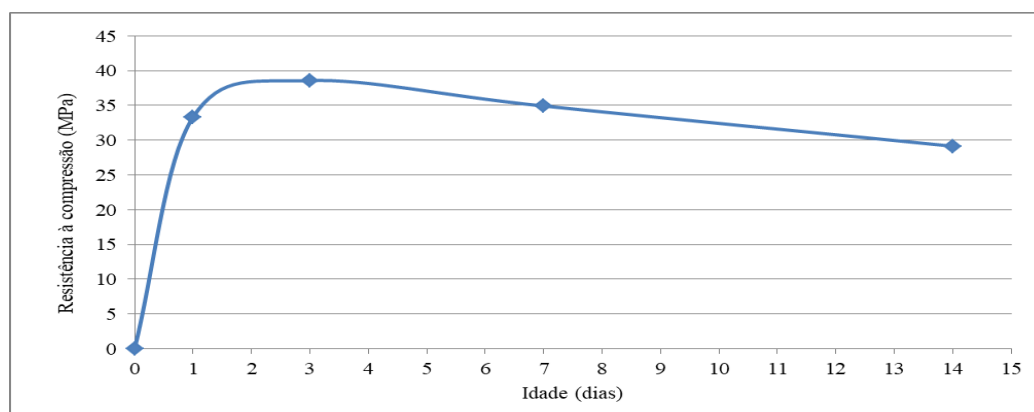
Tabela 4 – Resultados para a resistência à compressão.

Idade (dias)	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
1	33,31	2,04	6,13
3	38,57	2,23	5,77
7	34,92	2,71	7,75
14	29,14	3,30	11,32

Fonte: Autoria própria (2018).

Pode-se então perceber que, como esperado, o ganho de resistência no composto geopolimérico foi bastante rápido, atingindo uma média de resistência de 33,31 MPa em um único dia de endurecimento. Ao longo de três dias, ainda houve ganho de resistência obtendo-se uma média de 38,57 MPa. Para as idades de 7 dias e 14 dias houve um decréscimo de resistência, obtendo valores médios de 34,92 MPa e 29,14 MPa. Vale salientar, que houve casos em que após a ruptura observou-se agregados graúdos partidos, tendo a possibilidade de tal material limitar a resistência do geopolímero. A Figura 23 ilustra o desenvolvimento da resistência do material.

Figura 23 - Resistência do concreto geopolimérico ao longo do tempo.



Fonte: Autoria própria (2018).

É fato que após os 3 primeiros dias houve uma tendência ao decréscimo na resistência do material, e, mesmo não sendo o comportamento esperado, é também apresentado em alguns resultados da literatura (LIVI, 2013). Em algumas pastas geopoliméricas estudadas por Alves *et al.* (2016) houve o mesmo comportamento de resistência, de modo que em um dos casos a pasta apresentou resistências na ordem de 22,5, 37,5 e 20,0 MPa nas idades de 3, 7 e 28 dias respectivamente. No estudo de Rabelo; Silva e Neto (2014) houve uma pasta geopolimérica que apresentou resistências na faixa de 22,5, 17,5 e 18,0 MPa nas idades de 3, 7 e 28 dias, respectivamente.

Um fator que pode ser associado à perda de resistência seria a retirada do plástico filme dos corpos de prova no terceiro dia de cura, e devido estar sendo utilizado cimento como adição, pode ter havido a hidratação de parte desse material, como ocorre no aglomerante convencional, necessitando de cura úmida, o que não ocorre devido à natureza do geopolímero. Assim, ocorre o fenômeno de retração no produto de hidratação do cimento, gerando tensões internas no material. Inclusive, uma microfissuração superficial pôde ser observada nos corpos de prova com 14 dias de idade, indicando uma menor resistência.

4.2. Módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados para o módulo elástico dinâmico longitudinal médio nas idades de 1, 3, 7 e 14 dias estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados do módulo elástico dinâmico longitudinal.

Idade (dias)	Módulo de elasticidade dinâmico médio (GPa)	Desvio padrão (GPa)	Coefficiente de variação (%)
1	18,00	0,52	2,90
3	20,07	1,06	5,30
7	17,90	0,38	2,13
14	15,85	0,71	4,48

Fonte: Autoria própria (2018).

Pode-se perceber que o comportamento do módulo variou semelhante à evolução da resistência, apresentada no item anterior. Uma variação dos valores do módulo, para esse tipo de ensaio, pode ser explicada devido à existência de um gradiente de rigidez interno ao corpo de prova. Dessa forma, também podemos justificar essa tendência por causa da formação dos

nichos de cimento ao longo do corpo de prova, como já citado, o endurecimento lento, a necessidade de cura úmida e consequente retração, ocorrido nesses cristais, ocasionou a variação no módulo assinalado.

Dos Santos *et al.* (2013) avaliou o módulo de elasticidade dinâmico em concretos convencionais de resistências próximas às do concreto geopolimérico proposto neste trabalho. Em sua pesquisa obteve os valores de 47,0 GPa, 50,6 GPa e 43,9 GPa para concretos com resistência de 27,1 MPa, 33,4 MPa e 24,6 MPa de resistência, respectivamente. Assim, percebe-se um valor inferior de módulo elástico dinâmico para os materiais geopoliméricos. Percebe-se também que, a partir do referencial teórico, há uma variação nos valores do módulo para os geopolímeros sem uma tendência bem definida (KIRSCHNER; HARMUTH, 2004; BARRAZA, 2016; PELISSER *et al.*, 2018).

4.3. Amortecimento

Os resultados encontrados para o amortecimento do geopolímero se encontram na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados do amortecimento.

Idade (dias)	Amortecimento médio (%)	Desvio padrão (%)
1	1,22	0,65
3	0,76	0,19
7	0,69	0,19
14	0,89	0,15

Fonte: Autoria própria (2018).

É consenso que as propriedades de amortecimento aumentam com o teor de umidade do material, além da influência das microfissuras. Assim, percebe-se que até os 7 dias ocorre uma diminuição na umidade do material, podendo ser decorrente da utilização da água livre na fração de cimento Portland no composto, ou pela liberação da água após o processo de geopolimerização. Com 14 dias houve um leve acréscimo no amortecimento, que pode ter sido ocasionado pela entrada de umidade no material através das microfissuras detectadas pelo pesquisador, ou até por influência destas. Os valores médios variaram de 0,69-1,22 %,

apresentando valores inferiores aos de Zhu *et al.* (2014), 2,09-2,37 %, e Pan *et al.* (2013), 1,55-2,63 %.

4.4. Comparativo de custo

Com os preços tomados no mercado pelo autor, foi realizado um comparativo de custo do concreto geopolimérico com o concreto tradicional. Foi tomado o preço do aditivo plastificante da marca Vedalit, no site da Leroy Merlin¹², e utilizou-se a tarifa de água da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA¹³) para uso comercial e volume acima de 10 m³. A Tabela 7 mostra os insumos utilizados e seus custos, de acordo com os respectivos traços unitários.

Tabela 7 - Preços de insumos para concreto.

Material	Produto	Quantidade (kg)	Preço Unitário (R\$)	Preço Total (R\$)	Total (R\$)
Concreto de Cimento Portland	Cimento CP II - Z 32	1	0,46	0,46	
	Água	0,42	0,01	0,00	0,57
	Aditivo	0,00734	14,14	0,10	
Concreto Geopolimérico	Metacaulim	1	3,00	3,00	
	Hidróxido de sódio	0,078	1,30	0,10	
	Silicato de sódio	0,92	3,38	3,11	6,30
	Água	0,203	0,01	0,00	
	Cimento CP II - Z 32	0,2	0,46	0,09	

Fonte: Autoria própria (2018).

Como esperado, o concreto geopolimérico apresenta grande desvantagem econômica em relação ao concreto de cimento Portland. O concreto geopolimérico chega a ser 10,6 vezes mais caro. Podemos notar que o que mais encarece os geopolímeros é o seu precursor e o silicato de sódio, de forma que são materiais que podem ser substituídos por resíduos industriais ou outros tipos de materiais que possam ser mais viáveis financeiramente na região de produção (D'AGUIAR, 2012; BITENCOURT *et al.*, 2012; HAWA; TONNAYOPAS; PRACHASAREE, 2013).

¹² Disponível em: <https://www.leroymerlin.com.br/aditivo-plastificante-vedalit-11-vedacit_89534214>. Acesso em: 16 de out. de 2018.

¹³ Disponível em: <http://www.cagepa.pb.gov.br/wp-content/uploads/2015/01/ESTRUTURA-TARIF%C3%81RIA-2018_PUBLICADA.pdf>. Acesso em: 16 de out. de 2018.

Outra perspectiva é de que, com o passar dos anos, o regime de comércio seja mais severo com atividades poluidoras, encarecendo produtos como o cimento que tem grande impacto no meio ambiente. Sabendo-se do caráter sustentável do material geopolímero, seu preço pode se tornar competitivo com produtos derivados de cimento Portland (TORGAL; GOMES; JALALI, 2005; BORGES *et al.*, 2014).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

Diante do exposto na revisão bibliográfica, os materiais geopoliméricos tem grande potencial para substituir os materiais aglomerantes tradicionais, como a cal e os derivados do cimento Portland, apresentando vantagens ambientais, mecânicas e químicas, além de possibilitar a utilização de diversos resíduos industriais para sua fabricação, tornando-se uma alternativa sustentável de tratamento para estes materiais.

A partir dos resultados experimentais obtidos, os concretos geopoliméricos possuem resistência mecânica bastante satisfatória para o uso na construção civil, se aproximando dos concretos de classe C30. Os valores de módulo dinâmico se mostraram inferiores ao concreto convencional, mostrando uma maior deformabilidade dos geopolímeros (DOS SANTOS *et al.*, 2013; PELISSER *et al.*, 2018). O amortecimento nos geopolímeros também se mostrou inferior aos do concreto de cimento Portland, cujos valores giram em torno de 3,00% (ZHU *et al.*, 2014; PAN *et al.*, 2013). Dessa forma, o concreto geopolimérico, de fato, tem a capacidade de substituir os concretos comumente utilizados nas obras, porém deve-se atentar para uma análise mais profunda sobre as condições de serviço, no que se refere as deformações excessivas e em casos em que o amortecimento é levado em consideração para a estrutura como um todo.

Deve-se destacar que esse tipo de material ainda carece de normatização no Brasil, colocando em risco sua utilização no mercado. Além disso, a alta alcalinidade exigida da solução ativadora e o controle tecnológico necessário para a fabricação do geopolímero dificultam seu emprego em canteiros de obra comuns, sendo mais notável o direcionamento do concreto geopolimérico para indústrias de pré-fabricados, podendo inclusive se beneficiar do seu ganho de resistência nas primeiras horas, o que possibilita uma maior velocidade de reaproveitamento das fôrmas.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

O campo de pesquisa dos geopolímeros é muito amplo, dado que é uma tecnologia recente. Como sugestão para trabalhos futuros, seguem alguns temas:

- Avaliar o geopolímero estudado puro, sem a adição de cimento, ou utilizando outra fonte de CaO;

- Avaliar o geopolímero proposto em idades mais avançadas;
- Utilização de materiais alternativos, encontrados na região de João Pessoa - PB, como precursores do geopolímero;
- Estudos com diferentes dosagens, mantendo um material de referência, para avaliar a influência das diversas matérias primas utilizadas;
- Avaliar a microestrutura e propriedades térmicas e químicas do geopolímero.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEM, P. M. Avaliação do desempenho mecânico de concreto geopolimérico com o uso de fibra de aço. 2016. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016.

ALVES, C. V.; FROENER, M. S.; LONGHI, M.; RODRÍGUEZ, E. D.; KIRCHHEIM, A. P. Avaliação da resistência mecânica em geopolímeros a base de cinza pesada mediante otimização de cura térmica. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM C 1259: Dynamic Young's Modulus, Shear modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM E 1876: Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio by Impulse Excitation of Vibration. Philadelphia: 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM C 215: Standard test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional frequencies of concrete specimens. Philadelphia: 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

BITENCOURT, C. S.; TEIDER, B. H.; GALLO, J. B.; PANDOLFELLI, V. C. A geopolimerização como técnica para a aplicação do resíduo de bauxita. *Cerâmica*, São Paulo, v. 58, n. 345, p. 20-28, jan./mar. 2012.

BARRAZA, M. T. Desempenho mecânico de um compósito de matriz geopolimérica à base de metacaulim e nanobastões de carbetto de silício. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BORGES, P. H. R.; LOURENÇO, T. M. F.; FOUREAUX, A. F. S.; PACHECO, L. S. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 153-168, abr./jun. 2014.

CABALLERO, L. R. Comportamento físico-mecânico de matrizes geopoliméricas à base de metacaulim reforçadas com fibras de aço. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CARRASCO, E. V. M.; VARGAS, C. B.; SOUZA, M. D. F.; MANTILLA, J. N. R. Evaluation of mechanical characteristics of wood by means of impulse excitation. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 22, 2017.

COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. Amortecimento: classificação e métodos de determinação. Universidade de São Carlos, 2010.

DA SILVA, F. J.; DE OLIVEIRA, M. C.; MACHADO, M. V. S.; THAUMATURGO C. Cimentos geopoliméricos. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro. 2006.

D'AGUIAR, S. C. M. Proposta de estudo sobre composição de cimento geopolimérico utilizando resíduos sólidos. Monografia em Ciências Ambientais e Tecnológicas– Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN, 59p, 2012.

DAVIDOVITS, J. *Geopolymer Chemistry and Applications*, 4nd edition, Geopolymer Institute, 2008.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis Vol.37*, pp.1633-1656. 1991.

DAVIDOVITS, J. Mineral polymers and methods of making them. U.S. Patent n. 4,349,386, 14 set. 1982.

DAVIDOVITS, J. *Properties of Geopolymer Cements*. Geopolymer Institute, Alkaline Cements and Concretes, KIEV Ukraine, 1994.

DEGIRMENCI, F. Nurhayat. Freeze-thaw and fire resistance of geopolymer mortar based natural and waste pozzolans. *Ceramics–Silikáty*, v. 62, n. 1, p. 41-49, 2018.

DOS SANTOS, A. M.; CABRAL, L. M. C.; MONTEIRO, E. B.; DO LAGO HELENE, P. R. Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico para diferentes dosagens de concreto. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 55. 2013, Gramado. *Anais eletrônicos...* Gramado: IBRACON, 2013. Disponível em: <<https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/06/264.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2018.

FERREIRA, O. P. *Concretos polímeros*. São Carlos: USP, 2001. 55 p.

GARCIA, F. A. M.; GARCIA, R. S.; MENDES, I. T. D. O. Avaliação da viabilidade de utilização do concreto polimérico em substituição ao concreto convencional. *Revista Científica UNILAGO*, São José do Rio Preto, v. 1, n. 1. 2014.

GERALDO, R. H.; OUELLET-PLAMONDON, C. M.; MUIANGA, E. A. D; CAMARIM G. Alkali-activated binder containing wastes: a study with rice husk ash and red ceramic. *Cerâmica*, v. 63, n. 365, p. 44-51, 2017.

GIANNOPOULOU, I.; PANIAS, D. Structure, Design and Applications of Geopolymeric Materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE. DEFORMATIO IN PROCESSING AND STRUCTURE OF MATERIALS, 3., Serbia, 2007. *Proceedings...* Serbia, 2007.

GONÇALVES, D.K.; AGUILAR, M. T. P.; FRANÇA, L. R. G.; GUMIEIRI A. G. Cimentos geopoliméricos disponíveis no Brasil: microestrutura e resistência mecânica. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 60. 2016, Águas de Lindóia. *Anais eletrônicos...* Águas de Lindóia: ABCERAM, 2016. p. 820-829. Disponível em: < <http://metallum.com.br/60cbc/anais/PDF/06-013TT.pdf> >. Acesso em: 14 out. 2018.

HAWA, A.; TONNAYOPAS, D.; PRACHASAREE, W. Performance evaluation and microstructure characterization of metakaolin-based geopolymer containing oil palm ash. *The Scientific World Journal*, v. 2013, 2013.

KIRSCHNER, Andrea; HARMUTH, Harald. Investigation of geopolymer binders with respect to their application for building materials. *Ceramics Silikáty*, v. 48, n. 11, p. 7-20, 2004.

LIVI, C. N. Desenvolvimento de pasta de geopolímeros a base de cinza volante e hidróxido de sódio. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MAZZA, S. C. Estudo das propriedades mecânicas e da aderência entre argamassa de reparo geopolimérica e substrato de concreto com cimento Portland. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

PAN, Z.; FENG, K. N.; GONG, K.; ZOU, B.; KORAYEM, A. H.; SANJAYAN, J.; WENHUI, D.; COLLINS F. Damping and microstructure of fly ash-based geopolymers. *Journal of materials science*, v. 48, n. 8, p. 3128-3137, 2013.

PELISSER, F.; SILVA, B.; MENGER, M. H.; FRASSON, B. J.; KELLER, T. A.; TORII, A. J.; LOPEZ, R. Structural analysis of composite metakaolin-based geopolymer concrete. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 11, n. 3, p. 535-543, 2018.

PRADELLA, C. F. Vibrações em estruturas: estudo de edificação comercial em Garibaldi/RS. 2013.

RABELO, A. A.; SILVA, K. D.; NETO, E. F. Desenvolvimento de geopolímeros a partir de filito e caulim do estado do Pará. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 21. 2014, Cuiabá. *Anais eletrônicos...* p. 884-891. Disponível em: < https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/48/047/48047093.pdf >. Acesso em: 16 out. 2018.

RIBEIRO, D. B. Influência da adição de cálcio nas propriedades de pastas geopoliméricas destinadas a cimentação de poços de petróleo. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SANTOS, E. A.; MELO, M. A. F.; MELO, D. M. A.; FREITAS, J. C. O.; MARTINELLI, A. E.; MELO, V. R. M.; MEDEIROS, R. L. B. A. Influência da adição de diatomita nas propriedades de pastas geopoliméricas: volume de filtrado, tempo de espessamento e resistência à compressão. *Cerâmica*, São Paulo, v. 61, n. 359, p. 309-316, jul./set. 2015.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Relatório Anual 2013. 2018. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/snic-relatorio2010-11_web.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2018.

TORGAL, F.P.; CASTRO-GOMES J. P.; JALALI, S. Alkali Activated Geopolymeric Binder Using Tungsten Mine Waste: Preliminary Investigation. In Proceedings of Geopolymer 2005 World Congress. Saint Quentin . France. 2005.

VOGADO, M.; COSTA F.; LUTZE W.; GONG W. Resistência à corrosão de concreto geopolimérico de ultra-alto desempenho. In: Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, 1. 2014, Foz do Iguaçu. *Anais eletrônicos...* Foz do Iguaçu: ALCONPAT, 2014. Disponível em: <https://www.academia.edu/11270549/RESIST%C3%80ANCIA_%C3%80_CORROS%C3%83O_DE_CONCRETO_GEOPOLIM%C3%89RICO_DE_ULTRA-ALTO_DESEMPENHO>. Acesso em: 23 set. 2018.

ZHU, P.; KAI, G.; KENAN, F.; SANJAYAN, J. G.; WENHUI, D.; COLLINS, F. Damping capacity of fly ash-based geopolymer. In: 18th International Conference on Composite Materials. 2014.