Universidade Federal de Pernambuco
Centro Acadêmico do Agreste – Núcleo de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental

Guilherme Viana Wanderley

PRODUÇÃO DE MATERIAL PARA ENCHIMENTO LEVE DE ELEMENTOS DAS EDIFICAÇÕES A PARTIR DA MISTURA DE GEOPOLÍMERO COM ARGILA EXPANDIDA.

Caruaru - 2018

Guilherme Viana Wanderley

PRODUÇÃO DE MATERIAL PARA ENCHIMENTO LEVE DE ELEMENTOS DAS EDIFICAÇÕES A PARTIR DA MISTURA DE GEOPOLÍMERO COM ARGILA EXPANDIDA.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental

Área de concentração: Estruturas e Materiais

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Erika Pinto Marinho

Caruaru - 2018

Catalogação na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva CRB/4 - 1223

W245p Wanderley, Guilherme Viana.
Produção de material para enchimento leve de elementos das edificações a partir da mistura de geopolímero com argila expandida. / Guilherme Viana Wanderley. – 2018.
68f.; il.: 30 cm.

Orientadora: Erika Pinto Marinho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2018.
Inclui Referências.

1. Concreto leve. 2. Argila (Brasil). 3. Resistência de materiais. 4. Isolamento térmico. 5. materiais de construção (Brasil). I. Marinho, Erika Pinto (Orientadora). II. Título.

620 CDD (23. ed.) UFPE (CAA 2018-031)

Guilherme Viana Wanderley

PRODUÇÃO DE MATERIAL PARA ENCHIMENTO LEVE DE ELEMENTOS DAS EDIFICAÇÕES A PARTIR DA MISTURA DE GEOPOLÍMERO COM ARGILA EXPANDIDA.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental na Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental

Aprovado em: 30/01/2018

BANCA EXAMINADORA

_____
Prof.ª Dr.ª Erika Pinto Marinho (orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Prof. Dr. Humberto Correia Lima Junior (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Prof.ª Dr.ª Maria Suely Costa Câmara (examinador externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Aos meus familiares, Pai, Mãe, Irmãos, Avós, namorada e amigos por todo o empenho e apoio.

AGRADECIMENTOS

À professora Dr.ª Érika Pinto Marinho, minha orientadora, por todos os ensinamentos passados durante o mestrado, pela paciência, pela compreensão e pela oportunidade de tornar este mestrado possível.

À professora Dr.ª Ana Cecília Vieira da Nóbrega, por todo apoio e atenção dada a este trabalho.

Ao professor Dr. George Marinho Santos, pela dedicação em tornar possíveis os experimentos térmicos, pela confiança em mim depositada, além dos ensinamentos passados. A todo o pessoal de Natal/RN que deu apoio aos experimentos no laboratório de transferência de calor, em especial aos amigos Élder e Lampadinha.

A todos os servidores do laboratório de química da UFPE Campus do Agreste.

Aos servidores do PPGECAM – UFPE Campus do Agreste.

Aos servidores do laboratório de materiais do IFAL Campus Palmeira dos Índios, na pessoa do técnico Edvaldo pelo apoio dado.

Aos servidores do IFAL Campus Palmeira dos índios, que de alguma forma ajudaram e possibilitaram a realização deste mestrado, entre eles a professora Sheyla Karolina, o professor Emerson Malungo e o professor Maurício Ramos.

Ao grupo de pesquisa do laboratório de transferência de calor, em especial para Fábio que esteve presente desde o início, como também Jofre e Priscila.

Aos meus pais Alberto e Denise pelo apoio incondicional dado durante o mestrado. Aos meus irmãos e avós por estarem comigo a todo momento. A minha namorada Larissa que desde a entrega para inscrição até a defesa me acompanhou e me deu forças. E todos os familiares e amigos que torceram para o sucesso deste mestrado.

A Deus por ter me dado a chance de fazer um mestrado e ter me dado saúde e segurança durante todo o período do mesmo.

RESUMO

Na construção civil, materiais para enchimento têm como objetivo preencher espaços vazios deixados pelos elementos das edificações, além de contribuir com alguns benefícios para o desempenho da construção. Estes materiais não possuem em regra funções estruturais, mas podem substituir, por exemplo, parte da argamassa de contrapiso na regularização do mesmo ou podem servir como isolamento térmico e acústico em lajes e telhados. Um tipo de enchimento leve, não estrutural, atualmente utilizado é feito a partir da incorporação de argila expandida em pasta de Cimento Portland Comum. Neste trabalho foi produzido um enchimento leve com argila expandida, no qual o Cimento Portland Comum foi substituído por geopolímero, com o intuito de reduzir a densidade, usar aglomerante de menor impacto ambiental e pela possibilidade de produzir material para isolamento térmico. Foram produzidos corpos de prova de material para enchimento leve com argila expandida possuindo granulometria de 15 a 22 mm, utilizando como aglomerante geopolímeros com razão SiO_2/Al_2O_3 = 3,0, 3,5 e 4,0. Foram produzidas pasta de cimento com argila expandida e argamassa de cimento como referência. Os corpos de prova foram curados em temperatura ambiente para ensaio de resistência à compressão. Foram realizadas análises microestruturais (FTIR, FRX), estudo de desempenho térmico do material produzido e medidas de propriedades térmicas dos geopolímeros utilizados. Quanto às propriedades mecânicas, os materiais produzidos com geopolímero apresentaram densidade em torno de 540 a 580 kg/m³ e resistência à compressão entre 0,14 e 0,18 MPa, enquanto o material produzido com Cimento Portland Comum apresentou densidade de 687,44 kg/m³ e resistência à compressão de 0,53 MPa. Nas propriedades térmicas os geopolímeros apresentaram melhores resultados, com o geopolímero razão SiO_2/Al_2O_3 = 4,0 obtendo uma condutividade térmica de 0,56 W/m.K contra 0,77 e 0,75 W/m.K da pasta de Cimento Portland e argamassa respectivamente, o que fez com que o material com geopolímero tivesse obtido melhor desempenho térmico, isolando cerca de 9% da temperatura entre as faces da placa ensaiada, enquanto a placa de argamassa, utilizada como referência, conseguiu isolar apenas 1,22% da temperatura.

Palavras-chave: Enchimento leve. Geopolímero. Argila expandida. Resistência mecânica. Isolamento térmico. Materiais de construção.

ABSTRACT

In civil construction, filling materials have the purpose of occupying empty spaces in specifics elements of the buildings, in addition to contributing some benefits to the performance of the construction. These materials do not normally have structural functions, but can replace, for example, part of the subfloor mortar in the regularization of the same or can serve as thermal and acoustic insulation in slabs and roofs. One type of non-structural light filler currently used is made from the incorporation of expanded clay into Common Portland Cement paste. In this work, a light filler with expanded clay was produced, in which the common Portland cement was replaced by geopolymer, in order to reduce the density, to use agglomerate of less environmental impact and by the possibility of producing material for thermal insulation. Material samples were prepared for light filler with expanded clay having a particle size of 15 to 22 mm, using geopolymers as binder with ratio SiO_2/Al_2O_3 = 3,0, 3,5 e 4,0. Cement paste, with expanded clay, and cement mortar were produced as a reference. The specimens were cured at room temperature for compression strength test. Microstructural analysis (FTIR, FRX), thermal performance study of the material produced and measurements of thermal properties of the geopolymers used. As for the mechanical properties, the materials produced with geopolymer had a density of around 540 to 580 kg/m³ and a compressive strength of between 0,14 and 0,18 MPa, while the material produced with Common Portland Cement had a density of 687,44 kg/m³ and compressive strength of 0,53 MPa. In the thermal properties the geopolymers presented better results, with the geopolymer ratio SiO_2/Al_2O_3 = 4,0 obtaining a thermal conductivity of 0,56 W/m.K against 0,77 and 0,75 W/m.K of the Portland Cement paste and mortar respectively, which made the geopolymer material better thermal performance by isolating about 9%of the temperature between the faces of the tested plate, while the mortar plate used as a reference was able to isolate only 1,22% of the temperature.

Keywords: Light filler. Geopolymer. Expanded clay. Mechanical strength. Thermal insulation. Building materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Aplicação do EPS como material de enchimento em edificações. 18
Figura 2: Estrutura dos polissialatos. 20
Figura 3: Esquema das reações de policondensação. 21
Figura 4: Resistência de geopolímeros com diferentes razões Si/Al e temperatura de cura. 23
Figura 5: Elevadas resistências à compressão de geopolímeros em função da razão molar. 24
Figura 6: Relação entre densidade e condutividade térmica. 29
Figura 7: Organograma com atividades a serem realizadas durante o trabalho. 31
Figura 8: Geopolímero com argila expandida. 36
Figura 9: Moldagem dos corpos de prova, base regular e topo irregular. 37
Figura 10: Corpo de prova em ensaio à compressão. 38
Figura 11: Amostra sendo moldada com gabarito emplastificado. 39
Figura 12: Realização do ensaio com o KD2-PRÓ. 40
Figura 13: Desenho esquemático - ensaio de desempenho térmico. 41
Figura 14: Fonte de radiação luminosa. 42
Figura 15: Ensaio de desempenho térmico. 43
Figura 16: Espectros dos geopolímeros. 44
Figura 17: Espectro do metacaulim utilizado. 45
Figura 18: Áreas de ruptura e de cálculo. 47
Figura 19: Ruptura na argila expandida. 48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Condutividade térmica dos materiais estudados.....50
Gráfico 2: Capacidade calorífica dos materiais estudados.....51
Gráfico 3: Difusividade térmica dos materiais estudados. 52
Gráfico 4: Resistividade térmica dos materiais estudados. 53
Gráfico 5: Desempenho térmico argamassa de cimento.....54
Gráfico 6: Desempenho térmico pasta de cimento com argila expandida.....54
Gráfico 7: Desempenho térmico geopolímero 3,0 com argila expandida. 55
Gráfico 8: Desempenho térmico geopolímero 3,5 com argila expandida. 55
Gráfico 9: Desempenho térmico geopolímero 4,0 com argila expandida. 56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Aplicações de geopolímeros. 22
Tabela 2: Valores da condutividade térmica para alguns materiais de construção. ..26
Tabela 3: Valores da condutividade térmica para alguns isolantes térmicos. 27
Tabela 4: Descrição dos materiais, nomenclatura adotada e ensaios realizados. 33
Tabela 5: Composição Química dos precursores Geopoliméricos. 34
Tabela 6: Composição Química dos geopolímeros de referência. 35
Tabela 7: Consumo dos materiais para produção de 0,001178 m³ de geopolímero. 35
Tabela 8: Resistência à compressão das amostras aos 28 dias. 46
Tabela 9: Densidade dos materiais produzidos. 49
Tabela 10: Densidade dos materiais para enchimento leve produzidos. 49
Tabela 11: Variação de temperatura entre termopares externos e internos durante a primeira hora de ensaio. 57
Tabela 12: Intervalo de tempo necessário para estabilização das temperaturas nos termopares externos. 58
Tabela 13: Porcentagem de temperatura reduzida pelas placas. 59
Tabela 14: Temperaturas durante fase de resfriamento. 60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DRX - Difração de Raio-X
FRX - Fluorescência de Raios-X
FTIR – Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**14**
2	**OBJETIVOS**	**16**
2.1	**Objetivo geral**	**16**
2.2	**Objetivos específicos**	**16**
3	**FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**	**17**
3.1	**Enchimento leve na construção civil**	**17**
3.1.1	Argila expandida, produção e propriedades	19
3.2	**Geopolímeros**	**19**
3.2.1	Propriedades mecânicas dos materiais geopoliméricos	22
3.2.2	Estudo térmico de materiais geopoliméricos	24
3.3	**Processos de transferência de calor**	**25**
3.4	**Isolante térmico**	**25**
3.4.1	Condutividade térmica	26
3.4.2	Capacidade calorífica	27
3.4.3	Difusividade térmica	28
3.4.4	Resistividade térmica	28
3.4.5	Densidade aparente	28
4	**MATERIAIS E MÉTODOS**	**30**
4.1	**Materiais**	**30**
4.1.1	Argila expandida	30
4.1.2	Aglomerantes	30
4.1.2.1	*Pasta de cimento Portland comum*	*30*
4.1.2.2	*Pasta geopolimérica*	*30*
4.2	**Métodos**	**31**
4.2.1	Ensaios microestruturais dos materiais	31

4.2.2 Produção de material para enchimento leve 32
4.2.3 Ensaios mecânicos 36
4.2.4 Determinação de densidade 38
4.2.5 Propriedades térmicas 39
4.2.6 Desempenho térmico 40
5 RESULTADO E DISCUSSÕES 44
5.1 Ensaio microestrutural FTIR 44
5.2 Propriedades mecânicas 45
5.3 Densidade 48
5.4 Propriedades térmicas 50
5.4.1 Condutividade térmica 50
5.4.2 Capacidade calorífica 51
5.4.3 Difusividade térmica 52
5.4.4 Resistividade térmica 52
5.5 Desempenho térmico 53
6 CONCLUSÃO 61
7 PERSPECTIVAS 63
REFERÊNCIAS 64

1 INTRODUÇÃO

Com um mercado cada vez mais exigente e competitivo, as empresas da construção civil buscam minimizar o máximo seus custos, o que muitas vezes pode acarretar em uma perda da qualidade da edificação, a exemplo da diminuição da espessura de alguns sistemas como lajes e contrapisos. (BORGES, 2015)

Diante de tal cenário, a norma brasileira de desempenho NBR 15575:2012, estabelece os requisitos e critérios de desempenho de diversos sistemas como estruturas, pisos, vedações e coberturas. Nela, estes sistemas são avaliados entre outros quesitos, quanto ao seu desempenho térmico, acústico, estrutural e de segurança contra incêndio; a fim de garantir qualidade e segurança às edificações habitacionais.

Materiais para enchimento são aplicados aos diversos sistemas existentes, promovendo entre outros, regularização de nível e garantindo uma maior espessura e, por consequência, isolação entre pavimentos de uma edificação, por exemplo. Atualmente, esse enchimento tem sido feito com a própria argamassa de contrapiso produzida com Cimento Portand Comum e agregados de areia. Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral –DNPM (2012), o consumo de areia e pedra britada no Brasil em 2011 foi de aproximadamente 377 milhões de toneladas. Paralelamente, o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento SNIC (2012), calcula que o consumo de cimento em 2011 no Brasil foi de 69,3 milhões de toneladas.

Diversos materiais têm ganhado espaço na construção civil para realizar estes enchimentos, diminuindo assim o custo das construtoras com o contrapiso, além de trazer maiores benefícios como leveza nas estruturas, ser ambientalmente adequado, causar maior produtividade e melhor desempenho para a edificação. Entre estes materiais podem-se citar resíduos da construção civil e de outras indústrias, argila expandida e o poliestireno expandido (EPS), que segundo Tessari (2006), este último vem sendo aplicado na construção civil por obter todas as qualidades citadas.

A necessidade por novos materiais dá-se pelo fato do esgotamento dos recursos naturais utilizados na construção civil e também pela busca do desenvolvimento sustentável, visto que para a produção de 1 tonelada de clínquer de cimento, produz-se 0,5 toneladas de dióxido de carbono, devido à calcinação de calcário e 0,45 toneladas em razão da queima de combustível. Tornando a indústria do Cimento Portland Comum uma das mais poluentes no mundo (HELMY, 2016).

Na busca de novas tecnologias e inovações, a indústria da construção civil busca constantemente encontrar e desenvolver novos materiais que atendam de forma mais eficaz suas necessidades, minimizando efetivamente os danos causados ao meio ambiente. Marques (2007) cita a construção civil como uma das grandes responsáveis por diversos danos causados ao meio ambiente como: extração de matérias-primas, consumo de energia, geração de resíduos entre outros.

É desta forma que surge o geopolímero que pode ser considerado um material ambientalmente correto, uma vez que sua produção não contribui para os gases de efeito estufa e ainda tem a possibilidade de utilizar resíduos industriais ambientalmente poluentes como precursores. (HELMY, 2016).

Os geopolímeros têm sido estudados em todo o mundo como aglomerantes alternativos ao cimento Portland, bem como em outras aplicações industriais como, por exemplo, Santos (2017) que estuda a variação na razão molar SiO_2/Al_2O_3 na produção de geopolímeros para imobilizar contaminantes. Muita atenção tem sido dada ao desenvolvimento de geopolímeros nas últimas duas décadas, uma vez que, alguns desses materiais podem oferecer grandes vantagens em termos de resistência mecânica, durabilidade química, resistência térmica, e imobilização de resíduos tóxicos e perigosos (BORGES et al, 2016). Especialmente, a possibilidade de promover isolamento térmico e acústico, como atrativo para o desenvolvimento de materiais para enchimento leve e, por isso mesmo, o foco de estudo deste projeto.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver um material de construção, para enchimento leve em lajes, contrapiso, telhados, a partir da mistura de geopolímero com argila expandida, em substituição à pasta de Cimento Portland Comum.

.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o efeito de diferentes razões SiO_2/Al_2O_3 na composição do geopolímero, para a produção do sistema argila expandida - aglomerante;
- Medir a resistência à compressão e densidade dos corpos de prova;
- Realizar análise microestrutural do geopolímero;
- Avaliar o desempenho térmico do material;
- Estudar as propriedades térmicas dos geopolímeros utilizados;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Enchimento leve na construção civil

Durante a construção de obras na engenharia civil, por muitas vezes se tem a necessidade de executar enchimentos para preencher espaços, a fim de nivelar corretamente pisos, lajes, alvenarias ou simplesmente colocar uma camada de proteção, como encontrado em telhados, e o material utilizado para este fim nem sempre é o mais barato ou o mais indicado para o caso. Para se realizar um enchimento num elemento de uma edificação têm que se analisar algumas variáveis como: custo do material a ser utilizado, peso final que será acrescido na estrutura, conforto térmico, conforto acústico, resistência mecânica e resistência às intempéries.

Para Oliveira (2010) os materiais utilizados no mercado para isolamento térmico e absorção acústica são basicamente os materiais fibrosos como a lã de vidro e a lã de rocha, e os materiais porosos como os poliestirenos e poliuretanos.

Tessari (2006) destaca as vantagens do uso do poliestireno expandido (*Expanded Polystyrene* – EPS), como isolante térmico, isolante acústico, leveza, resistência e facilidade de manuseio. Esse estudo demonstrou que o material ganhou posição na construção civil, sendo utilizado em enchimento de lajes e fôrmas para concreto, lajes nervuradas, isolante térmico para telhados e paredes, isolante acústico de forros e pisos flutuantes, agregado para concreto leve, entre outros. Na Figura 01 é possível visualizar a aplicação de EPS em uma laje na construção civil.

Figura 1: Aplicação do EPS como material de enchimento em edificações.

Fonte: EME indústria de EPS (2018).

Já Borges (2015), estudou a utilização de resíduos industriais em substituição aos agregados em concretos e argamassas, com a finalidade de reduzir os custos dos materiais utilizados, aumentar a espessura dos elementos da construção a fim de melhorar seu desempenho acústico e reduzir o peso da estrutura, como por exemplo, utilizando EVA (Acetato Etileno de Vinila), resíduo da indústria de calçado, em contrapisos.

Muitos são os estudos a respeito dos concretos leves, para Atahan (2015) do ponto de vista das aplicações estruturais os concretos com agregados leves possuem uma menor densidade e melhores propriedades quanto a isolamento térmico e acústico. De acordo com a ASTM C 330, concretos que são utilizados agregados leves devem possuir uma resistência mínima à compressão aos 28 dias de 17 MPa e uma densidade seca entre 1120/1920 kg/m³.

Para reduzir a massa de concreto estrutural de peso normal, os agregados de pedra são substituídos por agregados leves, sendo esses geralmente produzidos por aquecimento de algumas matérias-primas (por exemplo, xisto, argila, cinzas volantes, etc.). Os concretos leves são utilizados principalmente para reduzir a massa e, consequentemente as cargas mortas e as ações sísmicas inerciais, tanto de estruturas novas como existentes, para facilitar o transporte e colocação de elementos pré-moldados. Em geral para justificar o uso de concreto leve, que é mais caro do

que o de peso normal, deve ser alcançado um custo mais baixo do projeto e/ou uma funcionalidade melhorada. (Fantilli, 2016)

3.1.1 Argila expandida, produção e propriedades

Os agregados de argila expandida são produzidos pela queima da argila natural, expandindo-a em temperaturas superiores a 1000°C, formando agregados leves e porosos de vários tamanhos (RICKARD, 2016).

Para Rickard (2016), os agregados de argila expandida são considerados adequados quando se deseja produzir um concreto que não possua elevada resistência à compressão. O uso de agregados de argila expandida em concretos reduz significativamente sua densidade e a condutividade térmica.

Schneider (2009) demonstra que um concreto com argila expandida de agregado possui uma dilatação térmica menor do que um concreto equivalente com quartzo como agregado. Isso se dá devido ao fato do coeficiente de dilatação térmica do quartzo ser maior do que o coeficiente de dilatação térmica da argila expandida.

3.2 Geopolímeros

Os geopolímeros são materiais obtidos pela reação entre a Sílica (SiO_2) e a Alumina (Al_2O_3) constituintes dos alumino silicatos, em um ambiente fortemente alcalino e, ao contrário do Cimento Portland Comum, sem a presença de Cálcio. Para Pinto (2006) a reação obtida para obtenção dos geopolímeros é do mesmo tipo da verificada nas zeólitas naturais, que são ligantes encontradas nos minerais e rochas que constituem a crosta terrestre, além de serem encontradas nos cimentos antigos que demonstram uma forte resistência à ação das intempéries e do tempo.

Geopolímeros são tipicamente formados por reação de caulinita desidroxilada com uma solução de silicato alcalino em condições altamente alcalina com conteúdo de água controlado. Os geopolímeros são estruturas amorfas, que consistem de uma rede das unidades de silicato e aluminato com compensação de metais alcalinos, habitualmente de sódio ou potássio. Apresentam uma falta de ordenação de longo alcance, que pode ser considerado análogo ao das zeólitas amorfas (Mackenzie, 2015).

Há dois principais constituintes dos geopolímeros, são eles: os materiais de base e os líquidos alcalinos. Os materiais de base para os geopolímeros de

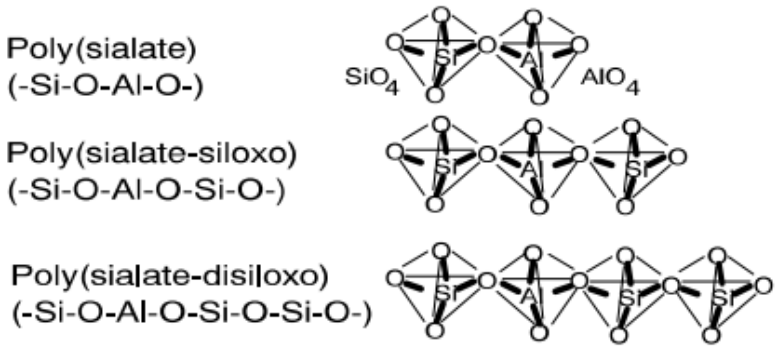
aluminossilicato devem ser ricos em silício (Si) e alumínio (Al). Estas fontes poderiam ser os minerais naturais, cinzas volantes, escórias de alto forno, lama vermelha, cinza de casca de arroz e etc; todos podendo ser utilizados como matéria prima. A escolha dos materiais de base para a produção de geopolímeros depende de fatores como disponibilidade e custo. Os líquidos alcalinos são de metais alcalinos solúveis, que são geralmente de sódio ou de potássio (Rangan, 2006). Alguns destes materiais já vêm sendo estudados e testados como aditivos para reação geopolimérica como é o caso desses dois grandes resíduos industriais, a lama vermelha e as cinzas volantes, que obtiveram bons resultados na geopolimerização (Kumar, 2012).

Davidovits (1994) sugeriu a utilização do termo polisialato para a designação química dos geopolímeros baseados em aluminossilicatos, sendo sialato uma abreviação de silício-oxo-aluminato. A rede sialato consiste em tetraedros SiO_4 e AlO_4 ligada alternativamente através da partilha de todos os oxigênios presentes. Alguns exemplos existentes dessas ligações químicas podem ser vistos na Figura 2. A presença dos íons de Na^+, K^+, Li^+, Ca^{2+}, Ba^{2+}, NH_4, H_3O^+ é necessária para equilibrar a carga negativa de Al^{3+} em coordenação tetraédrica. Os polisialatos são polímeros que variam de amorfo para cristalino segundo a fórmula empírica:

$$Mn\ (-(SiO2)Z-AlO2)n.wH2O$$

onde M é um cátion monovalente, tal como Sódio ou Potássio, n representa o grau de policondensação, w é o grau de hidratação e z 1, 2, 3 ou superior, até 32 (Rangan, 2006).

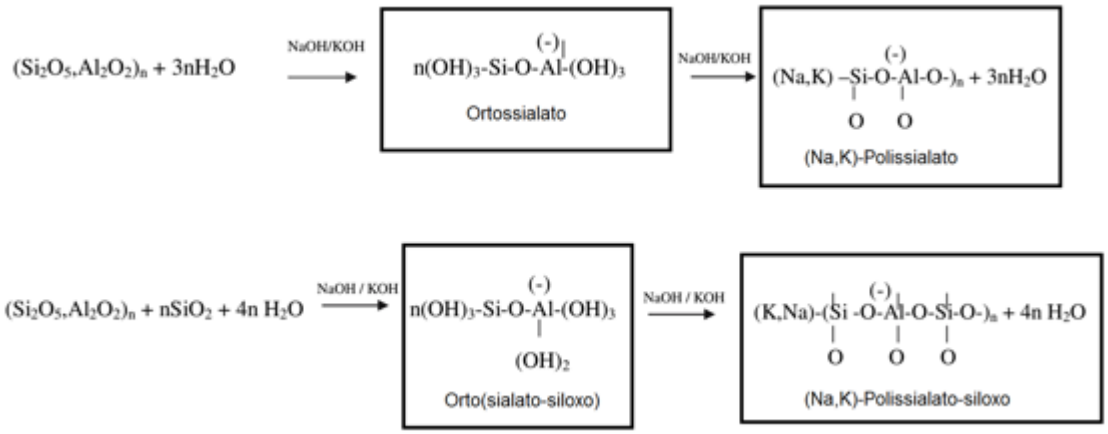
Figura 2: Estrutura dos polissialatos.



Fonte: Davidovits (1994).

Para Davidovits (1994) o esquema das reações de policondensação, responsáveis pelas ligações geopoliméricas, dá-se conforme pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3: Esquema das reações de policondensação.



Fonte: Davidovits (1991).

Em seu estudo Pinto (2006) mostra que para razões baixas de Si/Al obtém-se estruturas tridimensionais, do tipo zeolítico, favorecendo a resistência mecânica, e por isso mesmo podendo ser utilizados como aglutinantes nos materiais de construção e para aprisionamento de contaminantes. Na Tabela 1, mostram-se os diversos campos de aplicação possíveis para os geopolímeros, através da variação da razão Si/Al, estando entre elas a utilização como cimentos e concretos com baixa emissão de CO_2 e o encapsulamento de resíduos tóxicos e radioativos. Destaque para as razões Si/Al igual a 3:1 e maior que 3:1, onde os geopolímeros são compósitos resistentes ao fogo.

Tabela 1: Aplicações de geopolímeros.

Razão molar Si:Al	Aplicações
Si:Al 1:1	Tijolos Cerâmicas Proteção anti-fogo
Si:Al 2:1	Cimentos e concretos com baixa emissão de CO2 Encapsulamento de resíduos tóxicos e radioativos
Si:Al 3:1	Proteção anti-fogo: compósito com fibras Compósitos resistentes ao fogo de 200°C a 1000°C Equipamentos para fundição Ferramentas para aeronáutica (TITANIUM PROC.)
Si:Al > 3:1	Selantes para indústria 200°C a 800°C Ferramentas para aeronáutica (SPF ALUMINUM)
20:1 < Si:Al < 35:1	Resistente ao fogo e a altas temperaturas

Fonte: Adaptado de Pinto (2006).

Para Singh et al (2015), os geopolímeros podem ser uma alternativa de uso para substituir o Cimento Portland Comum devido à sua baixa emissão de gás carbônico (CO_2) em relação à indústria cimentícia. Em seu estudo o autor investiga as propriedades mecânicas do geopolímero, onde se demonstrou que para certas composições, os geopolímeros podem alcançar valores muito maiores de resistência à compressão quando comparados aos concretos produzidos a partir do Cimento Portland Comum.

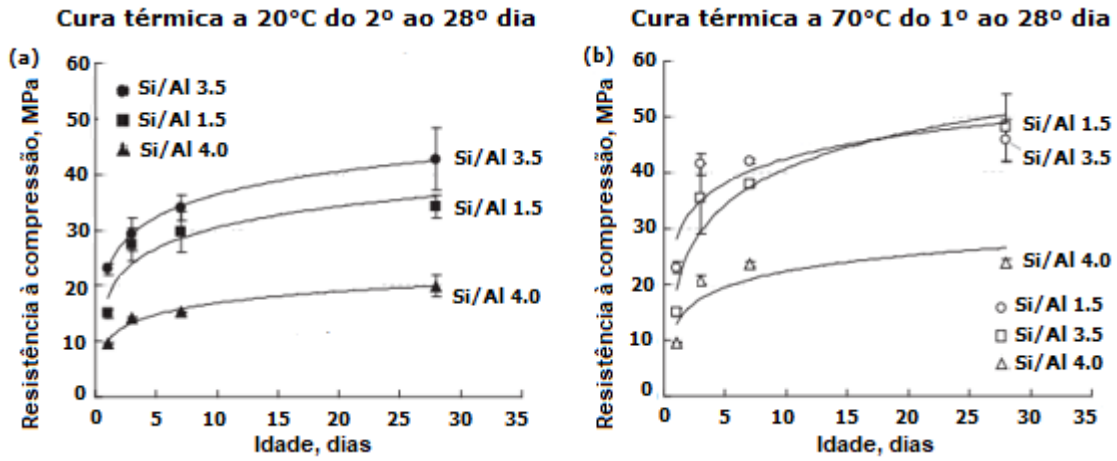
Santos (2017) aponta que geopolímeros com razão SiO_2/Al_2O_3 = 3,0 a 3,8 possuem, em geral, melhores propriedades de resistência. Enquanto que geopolímeros fora desta razão SiO_2/Al_2O_3 apresentam baixa resistência.

3.2.1 Propriedades mecânicas dos materiais geopoliméricos

Existem diversos estudos quanto às propriedades mecânicas dos geopolímeros. Kim (2017) relata que a resistência à compressão dos geopolímeros

pode variar de acordo com a combinação de Silício e Alumínio de seus precursores e da solução alcalina. Além de possuir uma forte ligação com as condições de cura, principalmente à temperatura submetida durante a cura. Em seu estudo foram medidas as resistências de geopolímeros com diferentes razões Si/Al em diferentes temperaturas de cura. Na Figura 4, observa-se que (a) para a cura térmica de 70°C no 1º dia e 20°C do 2º até o 28º dia, o geopolímero com razão Si/Al = 3,5 obteve os maiores valores de resistência à compressão aos 28 dias, chegando a 43 MPa e já na Figura 4 (b) para a cura térmica de 70°C do 1º ao 28º dia, o geopolímero com razão Si/Al = 1,5 obteve os maiores valores de resistência à compressão aos 28 dias, chegando agora a 48,1 MPa.

Figura 4: Resistência de geopolímeros com diferentes razões Si/Al e temperatura de cura.

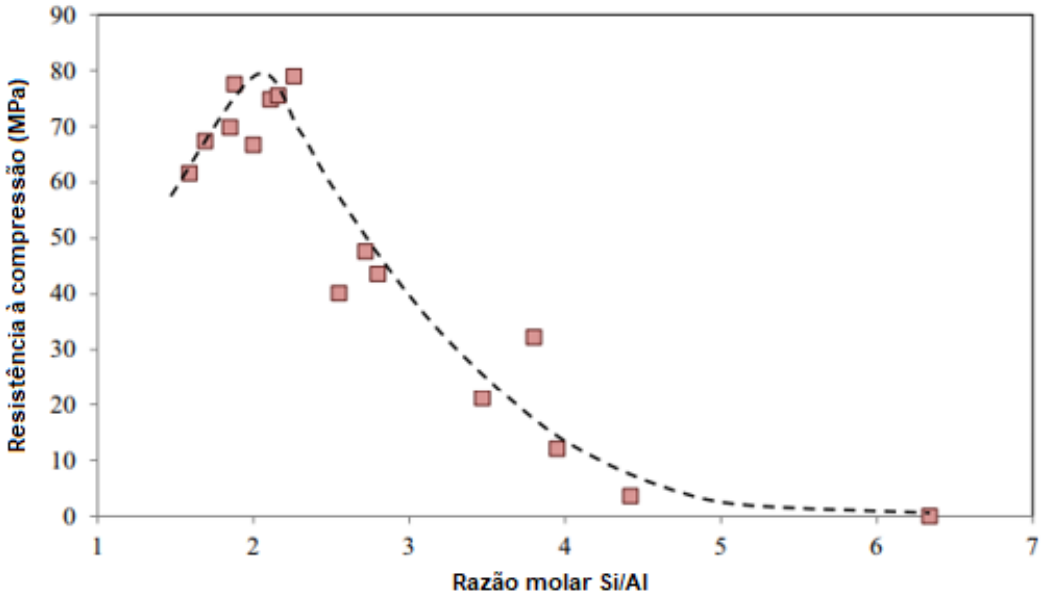


Fonte: Adaptado de Kim (2017).

Geopolímeros também podem atingir elevados valores de resistência à compressão. Yang (2017) utilizou rochas sedimentares reativas de sílica-alcali para encontrar geopolímeros com altas resistências à compressão. O resultado obtido foram geopolímeros que atingiram valores de até 80 MPa aos 7 dias de idade, sob cura de 60°C. Confirmando assim que o geopolímero é um material de construção que pode ser utilizado para atingir altas resistências. Na Figura 5 são apresentados os valores de resistência atingidos pelos geopolímeros com diferentes razões molar de Si/Al aos 7 dias de idade. Há de se notar também a importância da razão Si/Al na resistência final do geopolímero, onde para baixas razões de Si/Al, próximas a 2,0 a resistência à compressão foi alta, enquanto que para razões maiores os valores da

resistência foram decaindo até aproximar-se de zero MPa, para uma razão Si/Al maior do que 6,0.

Figura 5: Elevadas resistências à compressão de geopolímeros em função da razão molar.



Fonte: Yang (2017).

3.2.2 Estudo térmico de materiais geopoliméricos

O geopolímero é um material que apresenta uma boa resistência ao fogo, para temperaturas de 25° C até 600° C, independentemente do tipo de ensaio (durante ou pós-queima), flexão ou compressão. Os geopolímeros conservam ou até aumentam sua resistência, obtendo claramente um comportamento distinto daquele observado nos cimentos Portland Comum (JIMÉNEZ et al, 2015).

Analisando a condutividade térmica de suas amostras, Zhang et al (2015) concluíram que o concreto geopolimérico exibe melhor propriedade de isolamento térmico do que o concreto de Cimento Portland Comum de mesma densidade.

Sarker (2015) comparou a resistência ao fogo de painéis de concreto feitos a partir de Cimento Portland Comum e de Geopolímero produzido com cinzas volantes. Em seu estudo, os elementos dos dois materiais foram expostos ao fogo até uma temperatura de 960° C durante 2 horas, e após voltar à temperatura ambiente foram analisados quanto ao desempenho à compressão. Os resultados obtidos demostraram que os painéis de concreto geopolimérico apresentaram maior resistência à compressão do que os painéis de concreto de Cimento Portland. Foi

observado que os concretos geopoliméricos apresentaram uma resistência residual de 66%, enquanto os concretos de Cimento Portland obtiveram 52%. Porém, no que se refere à condutividade térmica os resultados demonstraram que os painéis de concreto geopolimérico, em altas temperaturas, possuíram uma transferência de calor mais rápida do que o concreto de Cimento Portland, resultando assim numa maior condutividade térmica.

Duan (2017) estudou um material composto por geopolímero e poliestireno, com o intuito de avaliar entre outras suas propriedades térmicas e sua resistência mecânica. Embora tenha obtido baixos valores para condutividade térmica na ordem de 0,03 a 0,09 W/m.K, os valores para resistência à compressão ficaram na ordem de 3 a 4 MPa. Duan (2017) percebeu que quanto maior a proporção de poliestireno menor a condutividade térmica e menor a resistência mecânica.

3.3 Processos de transferência de calor

Após a adição de uma carga térmica através de uma certa quantidade de calor, a dissipação do calor entre materiais pode acontecer por meio de três processos, a condução, a convecção e/ou radiação. A condução ocorre através da interação entre partículas de diferentes temperaturas por meio de fônons, quantidades específicas de vibração mecânica que se propagam através do material. A condução ocorre principalmente entre materiais sólidos. A convecção dá-se pela troca de calor entre um corpo sólido e um fluido adjacente, por meio de difusão térmica e advecção. A radiação ocorre por meio de ondas eletromagnéticas, que interagem à distância entre sistemas com diferentes níveis energéticos (AZEVEDO, 2017).

3.4 Isolante térmico

Para Souza Filho (2015) um material isolante térmico pode ser definido como aquele que dificulta a dissipação de calor, estabelecendo uma barreira à passagem do calor entre dois meios. O autor destaca algumas propriedades que são imprescindíveis para um material isolante térmico, como: condutividade térmica, resistividade térmica, calor específico, capacidade térmica e resistência à chama (inflamabilidade).

Um edifício que se preocupa com as propriedades térmicas de seus materiais se torna mais sustentável, ambientalmente correto e tende a diminuir seu consumo de energia (NEMATOLLAHI, 2017).

3.4.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica é uma característica específica de cada material e quantifica a capacidade dos materiais de conduzir calor, assim quanto menor for a condutividade térmica de um material melhor será o isolamento térmico do mesmo (VELOSA, 2013).

A NBR 15220:2003 define a condutividade térmica como a propriedade física que busca medir o fluxo de calor em um material homogêneo e isótropo, quando submetido a um certo gradiente de temperatura. A condutividade térmica é medida em W/mK, onde W é a potência térmica em watts, m é unidade de comprimento em metro, e K é unidade de temperatura em Kelvin. Na Tabela 2, são apresentados os dados de condutividade térmica de alguns materiais de construção, valores que podem variar de acordo com a densidade de massa aparente do material.

Tabela 2: Valores da condutividade térmica para alguns materiais de construção.

Material	Condutividade térmica (W/mK)
Argamassa comum	1,15
Argamassa de gesso	0,7
Argamassa celular	0,4
Tijolos e telhas de barro	0,7 - 1,05
Placas de fibrocimento	0,65 - 0,95
Concreto normal	1,75
Brita ou seixo	0,7
Areia seca	0,3
Areia (10% de umidade)	0,93
Areia (20% de umidade)	1,33
Areia saturada	1,88
Argila expandida	0,16

Fonte: Adaptado da NBR 15220:2003.

A NBR 15220:2003 traz ainda os valores da condutividade térmica para alguns isolantes térmicos, conforme demonstrado na Tabela 3:

Tabela 3: Valores da condutividade térmica para alguns isolantes térmicos.

Material	Condutividade térmica (W/mK)
Lã de rocha	0,045
Lã de vidro	0,045
Poliestireno expandido moldado	0,04
Poliestireno estrudado	0,035
Espuma rígida de poliuretano	0,03

Fonte: Adaptado da NBR 15220 (2003).

Muitos são os estudos quanto à condutividade dos geopolímeros. Lach (2016) estudou a condutividade térmica de espumas geopoliméricas e encontrou valores que variaram entre 0,0826 a 0,1273 (W/mK).

Shanmugasundaram (2017) estudou o efeito da cura de argamassas geopolímericas na condutividade térmica e percebeu uma grande variação nos valores obtidos. Quando submetida à cura em temperatura ambiente, a argamassa geopolimérica possuiu uma condutividade térmica de 0,910 (W/mK), enquanto quando curada em uma estufa a mesma argamassa obteve uma condutividade térmica de 0,363 (W/mK).

3.4.2 Capacidade calorífica

Azevedo (2017) define a capacidade calorífica, como a propriedade que indica a quantidade de energia térmica necessária para haver a alteração da temperatura dos materiais quando submetidos a uma fonte térmica de magnitude constante, que é dada em J/m³.K. Quanto maior for o valor da capacidade calorífica do material, melhor será para seu isolamento térmico.

Souza Filho (2015) define calor específico como a quantidade de calor que necessita ser transmitida, para que uma unidade de volume de determinada substância varie em um grau sua temperatura, sob condições normais de temperatura e pressão. Já a capacidade térmica pode ser definida como a determinação da

variação de temperatura de um material, a partir de certa quantidade de calor fornecida ao mesmo.

3.4.3 Difusividade térmica

A difusividade térmica é a relação entre a condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica do material. A difusividade é uma propriedade que está relacionada com a propagação do calor no material, através de uma variação de temperatura. Logo quanto maior a difusividade térmica mais rápido o calor vai se propagar no material, sendo assim pior para o isolamento térmico. A difusividade térmica é dada por m^2/s (BEZERRA, 2003).

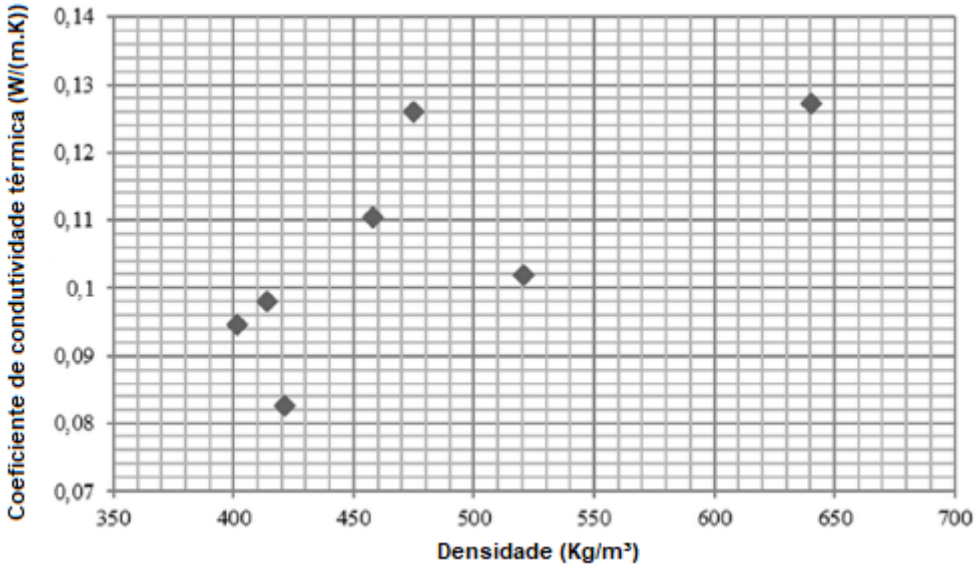
3.4.4 Resistividade térmica

A resistividade térmica de um material corresponde à dificuldade de transmissão de calor e é medida pela relação da espessura do material e sua condutividade térmica. Quanto menor for a condutividade térmica e maior for a espessura do material, maior será a resistividade térmica e, consequentemente, maior será o isolamento térmico. A resistividade térmica é medida em °C.cm/W (Velosa, 2013).

3.4.5 Densidade aparente

A densidade dos materiais está diretamente relacionada com suas propriedades térmicas. Em seu estudo Lach (2017) demonstra que quanto menor a densidade do material menor deverá ser a sua condutividade térmica. Na Figura 6 são apresentados os valores encontrados para densidade e condutividade térmica em espumas geopolimérica.

Figura 6: Relação entre densidade e condutividade térmica.



Fonte: Lach (2017).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Argila expandida

A argila expandida foi utilizada como agregado graúdo do material. A argila expandida utilizada foi a 2215 do fabricante CINEXPAN Argila Expandida. De acordo com o fabricante a argila expandida 2215 é indicada para enchimentos de 4 a 10 cm, possui granulometria de 15 a 22 mm, o que equivale a brita número 1 e tem uma densidade aparente de 500 kg/m³ (+ - 10).

4.1.2 Aglomerantes

4.1.2.1 Pasta de cimento Portland comum

A pasta de cimento produzida foi feita de acordo com a indicação do fabricante CINEXPAN, para execução de enchimento leve com argila expandida e suas amostras de enchimento leve foram utilizadas como referência para este trabalho, visto que já são utilizadas comercialmente.

O traço indicado para a pasta de cimento foi de aproximadamente 20 a 25 litros de água para 50 kg de cimento (1 saco). O cimento utilizado foi o comercial CP II-Z 32.

4.1.2.2 Pasta geopolimérica

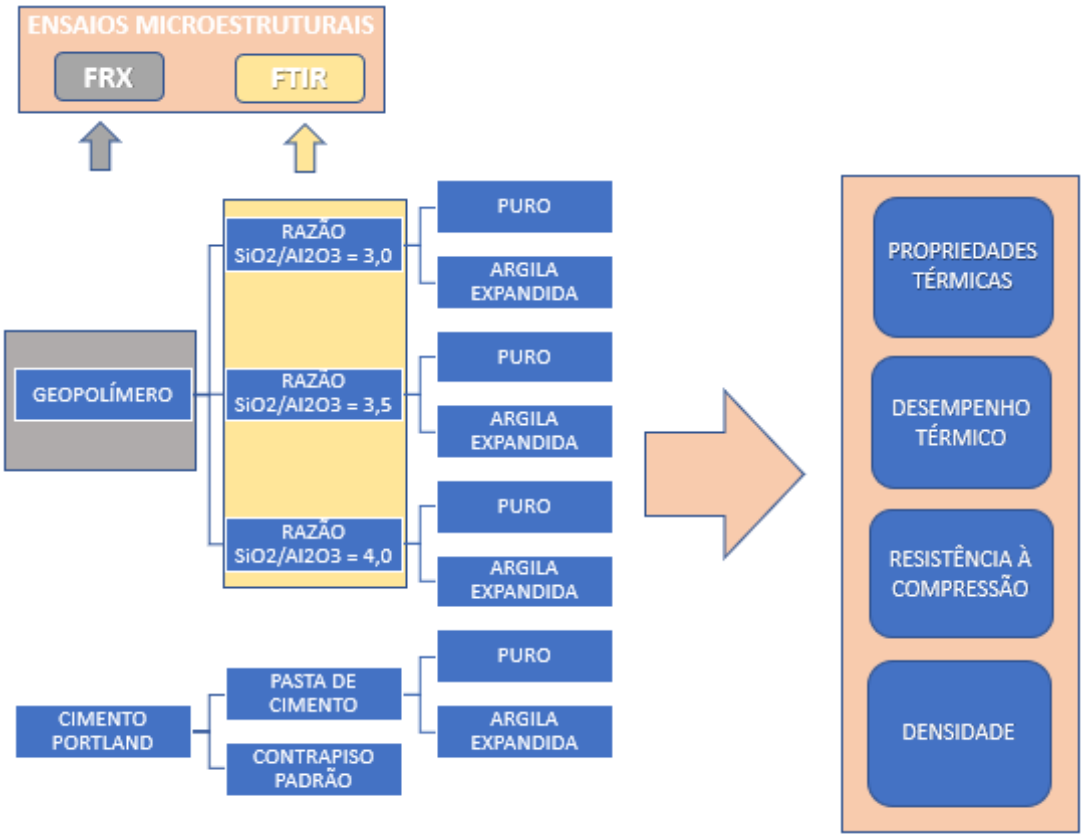
A partir da literatura foram produzidos diferentes geopolímeros, de acordo com a variação da relação SiO_2/Al_2O_3. No total foram produzidos três geopolímeros, sendo, um com a razão $SiO_2/Al_2O_3 = 3,0$; um com a razão $SiO_2/Al_2O_3 = 3,5$; e um com a razão $SiO_2/Al_2O_3 = 4,0$.

Os geopolímeros utilizados neste trabalho são exatamente os mesmos produzidos, estudados e publicados por Santos (2017), e fazem parte do grupo de pesquisa do laboratório de química da UFPE campus Caruaru, com o intuito de estudar uma nova aplicação para este material produzido.

4.2 Métodos

Os experimentos foram realizados conforme organograma abaixo, mostrado na Figura 7, onde foram produzidos ao total 9 tipos de amostras, analisadas por ensaios de FRX nos materiais precursores dos geopolímeros para determinação das razões SiO_2/Al_2O_3 e FTIR nos geopolímeros produzidos. E por fim desempenho térmico, ensaios de propriedades térmicas, ensaios de resistência e densidade em todas as amostras.

Figura 7: Organograma com atividades a serem realizadas durante o trabalho.



Fonte: Autor (2017).

4.2.1 Ensaios microestruturais dos materiais

Foram realizados ensaios de espectrometria Fourier de Infravermelho (FTIR) nos geopolímeros escolhidos, a fim de constatar em seus espectros a formação geopolimérica, bem como no metacaulim para observar sua influência no geopolímero produzido.

4.2.2 Produção de material para enchimento leve

Todos os materiais produzidos durante este trabalho estão apresentados na Tabela 4, onde são informados a descrição do material, a sigla utilizada para sua representação no texto e os ensaios que foram realizados por amostra. As dimensões dos moldes e suas peculiaridades são explicadas mais adiante na descrição de cada ensaio, visto que, cada ensaio possui necessidades diferentes e assim moldes diferentes.

Tabela 4: Descrição dos materiais, nomenclatura adotada e ensaios realizados.

Descrição materiais produzidos	Nomeclatura	Ensaios realizados
Geopolímero razão SiO_2/Al_2O_3 = 3,0	GEO3,0	Propriedades térmicas
Geopolímero razão SiO_2/Al_2O_3 = 3,5	GEO3,5	Propriedades térmicas
Geopolímero razão SiO_2/Al_2O_3 = 4,0	GEO4,0	Propriedades térmicas
Pasta de cimento (500 ml de H2O para 1 kg de cimento)	PCI	Propriedades térmicas
Argamassa de cimento para contrapiso (traço 1:3 cimento/areia)	ARG	Propriedades térmicas, desempenho térmico e densidade
Geopolímero razão SiO_2/Al_2O_3 = 3,0 + Argila expandida	GEO3,0.AE	Desempenho térmico, resistência à compressão e densidade
Geopolímero razão SiO_2/Al_2O_3 = 3,5 + Argila expandida	GEO3,5.AE	Desempenho térmico, resistência à compressão e densidade
Geopolímero razão SiO_2/Al_2O_3 = 4,0 + Argila expandida	GEO4,0.AE	Desempenho térmico, resistência à compressão e densidade
Pasta de cimento + Argila expandida	PCI.AE	Desempenho térmico, resistência à compressão e densidade

Fonte: Autor (2017).

Para produção do geopolímero foi utilizado Metacaulim comercial: METACAULIM HP ULTRA, fabricado pela Metacaulim Brasil, como fonte de sílica e alumina. Já para a produção da solução alcalina foi utilizado hidróxido de sódio em pérolas, da empresa QUÍMICA MODERNA, com pureza maior do que 97% e silicato de sódio da empresa DIATOM (30% SiO_2, 9% Na_2O E 61% H_2O) com água destilada. Para que fosse possível determinar a razão SiO_2/Al_2O_3 do geopolímero, o metacaulim foi enviado para ensaio de FRX (espectrometria de fluorescência de raios-x). Na Tabela 5 são mostrados os resultados de análise química do precursor geopolimérico Metacaulim HP.

Tabela 5: Composição Química dos precursores Geopoliméricos.

Óxidos	**Metacaulim**
SiO_2	52,16%
Al_2O_3	35,88%
K_2O	1,34%
CaO	0,85%
MgO	0,27%
Fe_2O_3	4,35%
Outros óxidos	1,35%
Perda ao fogo	3,82%

Fonte: Santos (2017).

Os geopolímeros foram produzidos da seguinte forma: dissolveu-se o hidróxido de sódio para obtenção de uma solução de NaOH com 10 mol/l, processo que gera uma grande reação exotérmica, por isso a solução NaOH ficou em repouso até que se alcançasse a temperatura ambiente. Após o repouso, a solução foi combinada ao silicato de sódio, formando a solução ativadora, esta ficou em repouso por 24 horas em temperatura ambiente. Passado o período de repouso da solução ativadora, foi adicionado a metacaulim ao sistema, que foi misturado e homogeneizado durante aproximadamente 4 minutos. A composição química utilizada dos geopolímeros está apresentada na Tabela 6.

Tabela 6: Composição Química dos geopolímeros de referência.

Óxidos	Amostras		
	GP3.0	GP3.5	GP4.0
SiO_2	47,65	51,90	54,33
Al_2O_3	30,16	27,67	26,30
Na_2O	17,30	15,84	15,18
K_20	0,84	0,80	0,75
CaO	0,07	0,07	0,07
MgO	0,25	0,20	0,12
Fe_2O_3	2,20	2,19	2,07
Co_2O_3	0,00	0,00	0,00
CuO	0,07	0,00	0,00
Outros	1,46	1,33	1,18

Fonte: Santos (2017).

Para a confecção dos materiais compostos com argila expandida era necessário aproximadamente 0,17 m³ de geopolímero para 1 m³ de material produzido. O baixo valor se justifica pelo fato do geopolímero ser utilizado apenas para servir como uma “cola” que liga as argilas expandidas. Sendo assim as argilas expandidas eram misturadas ao geopolímero até que cada uma delas ficasse totalmente envolta pelo geopolímero.

A proporção utilizada dos materiais precursores para confecção dos geopolímeros é apresentada na Tabela 7. Esta proporção produz aproximadamente 0,001178 m³ de geopolímero. O que é suficiente para produzir 4 placas do material de geopolímero com argila expandida, possuindo cada uma 23 x 23 cm de lado e 3 cm de espessura (Volume = 0,001587 m³ por placa).

Tabela 7: Consumo dos materiais para produção de 0,001178 m³ de geopolímero.

Material utilizado	Unidade	GEO3,0	GEO3,5	GEO4,0
Metacaulim	g	273,35	273,35	273,35
Silicato de Sódio	g	106,71	206,85	306,99
Hidróxido de Sódio	g	69,68	57,7	45,71
Água destilada	ml	174,22	144,25	114,28

Fonte: Autor (2017).

Na Figura 8, é apresentado o material composto por geopolímero com argila expandida pronto para ser moldado.

Figura 8: Geopolímero com argila expandida.

Fonte: Autor (2017).

4.2.3 Ensaios mecânicos

Foram realizados ensaios de compressão, para os quais foram moldados 4 corpos de prova das amostras de GEO3,0.AE, GEO3,5.AE, GEO4,0.AE e PCI.AE. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 20 centímetros de altura por 10 centímetros de diâmetro. Os ensaios foram realizados aos 28 dias de idade da moldagem dos corpos de prova e sob orientação da ABNT NBR 13279: 2005. A cura do material ocorreu em temperatura ambiente. Os corpos de prova foram moldados em 2 etapas, onde na primeira foi colocado o material no molde, fazendo assim com que sua base ficasse plana enquanto seu topo ficasse irregular. Esta etapa está representada na Figura 9.

Figura 9: Moldagem dos corpos de prova, base regular e topo irregular.

Fonte: Autor (2017).

A segunda etapa consistiu na moldagem de uma base para regularizar o topo do corpo de prova, sendo utilizado um nível bolha para garantir a planicidade do corpo de prova.

Os ensaios de resistência mecânica foram realizados no Instituto Federal de Alagoas, campus Palmeira dos Índios, utilizando uma prensa EMIC. De acordo com as especificações técnicas da prensa, a mesma possui uma capacidade de carga de 30.000 kgf em ambos os sentidos e uma faixa de medição de carga recomendável de 50:1 de sua capacidade. Os resultados obtidos eram dados em tensão (MPa), onde um computador ligado à prensa com software próprio da mesma, fornecia os dados. Na Figura 10, demonstra-se o ensaio à compressão de um corpo de prova.

Figura 10: Corpo de prova em ensaio à compressão.

Fonte: Autor (2017).

4.2.4 Determinação da densidade

A densidade dos materiais foi medida de acordo com as recomendações da NBR 13280:2005, onde utilizou-se um paquímetro com resolução de 0,1 mm e uma balança com resolução de 0,1 g.

Como o interesse deste trabalho era definir possíveis vantagens para a aplicação do material, a densidade foi feita de modo simples, onde basicamente foi medido o peso do material para o volume que o mesmo ocupava como um todo, envolvendo os vazios, e não o volume real do material.

A densidade foi medida nas placas utilizadas para o ensaio de desempenho térmico, e foi calculada pela fórmula:

$$D = m/V,$$

onde,

D = densidade da placa;

m = massa da placa em gramas;

V = volume ocupado pela placa em metros cúbicos.

4.2.5 Propriedades térmicas

Os ensaios de desempenho térmico e propriedades térmicas foram realizados no Laboratório de Transferência de Calor – LTC da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Os ensaios de propriedades térmicas realizados foram a condutividade térmica, difusividade, capacidade calorífica e resistência térmica. Durante o procedimento cada amostra foi ensaiada 3 vezes, onde eram fornecidos os valores da condutividade térmica, difusividade, capacidade calorifica e resistência térmica.

Para os ensaios das propriedades térmicas foram produzidos 3 corpos de prova de cada material. Os corpos de prova eram cilíndricos e possuíam 5 cm de altura por 2,5 cm de diâmetro. Para a moldagem do material foi introduzido no molde um gabarito com dimensões necessárias para a introdução das sondas do equipamento de medição, conforme demonstrado na Figura 11. Para o caso das amostras de geopolímero, os gabaritos foram revestidos por uma fita adesiva para impedir o contato do aço com o material.

Figura 11: Amostra sendo moldada com gabarito emplastificado.

Fonte: Autor (2017).

Para realização dos ensaios foi utilizado o KD2-PRO, equipamento que opera por fluxo de calor controlado. O KD2-Pro é um equipamento que possui duas sondas, sendo uma, a agulha de resistência para aquecimento das amostras por efeito Joule, e a outra a agulha de medição de temperatura.

O equipamento KD2-Pro realiza o ensaio em dez minutos, sendo necessário uma espera mínima de quinze minutos para realização do próximo ensaio, tempo este pedido pelo fabricante para que as temperaturas voltem ao normal. Durante o ensaio, a sonda juntamente com o material são colocados em uma câmara, a fim de isolar termicamente o conjunto, conforme apresentado na Figura 12.

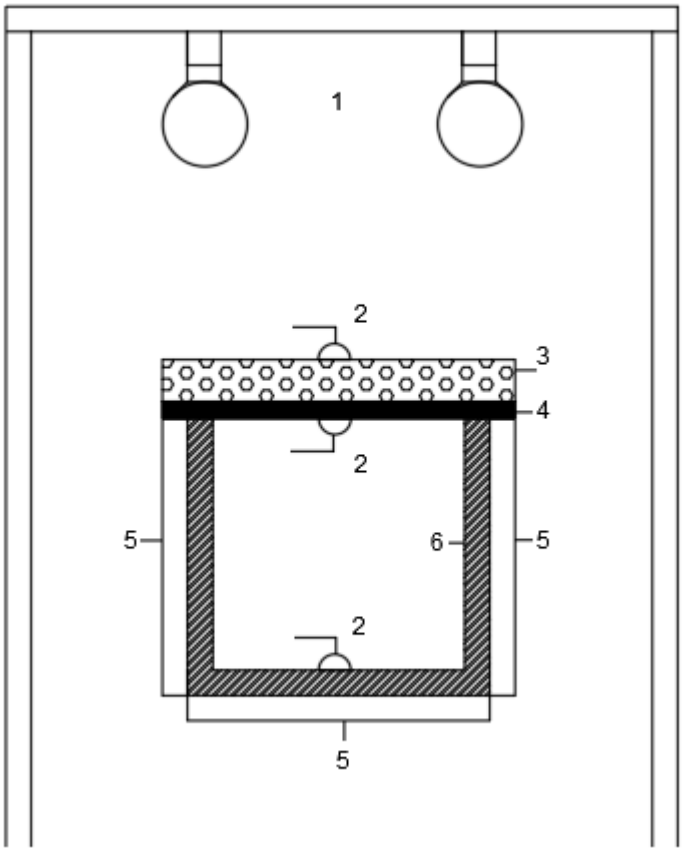
Figura 12: Realização do ensaio com o KD2-PRÓ.

Fonte: Autor (2017).

4.2.6 Desempenho térmico

Para análise do comportamento térmico dos materiais produzidos, os mesmos foram ensaiados no Laboratório de Transferência de Calor da UFRN. Durante todos os ensaios o laboratório era mantido numa temperatura constante de 23 °C, através de um ar condicionado, sendo os testes realizados conforme esquematizado na Figura 13.

Figura 13: Desenho esquemático - ensaio de desempenho térmico.



Fonte: Autor (2017).

onde:

1: Fonte de radiação térmica: estrutura composta por 16 lâmpadas distribuídas em duas fileiras de 8 lâmpadas cada, obtendo um total de 1800 watts de potência. Na Figura 14 demonstra-se a fonte de radiação.

Figura 14: Fonte de radiação luminosa.

Fonte: Autor (2017).

2: Termopares: no total foram utilizados 3 termopares por placa, sendo um na face superior da placa, um na face interior da placa e um na parte inferior da caixa. Os termopares eram fixados com cola araldite misturada a pó de cobre, com o intuito de transmitir o calor da placa para o termopar, visto que o cobre possui uma alta condutividade térmica podendo chegar a valores maiores do que 400 W/m.K (LEONG, 2017).

3: Placa com o material ensaiado. As placas foram produzidas com dimensões de 23 x 23 cm de lado e 3 cm de espessura. Foram ensaiadas cinco placas de cada tipo de material.

4: Lâmina de papel alumínio. Devido ao fato das placas que possuíam argila expandida não serem maciças, ou seja, existiam frestas que permitiriam a passagem de luz devido a sua pequena espessura (três centímetros), fez-se necessário a utilização de uma folha de papel alumínio para impedir que estas frestas influenciassem nos ensaios. Em todos os ensaios foram utilizados a folha de alumínio.

5: Placas de isopor com o intuito de manter a caixa de ensaio termicamente isolada.

6: Caixa de madeira utilizada para realizar os ensaios. Ao total foram preparadas 5 caixas.

Na Figura 15, é mostrado o ensaio sendo realizado durante a fase de aquecimento e nela é possível visualizar os 6 itens anteriormente descritos.

Após organizado toda a estrutura de ensaio, o mesmo era iniciado sendo dividido em duas etapas principais. A primeira etapa acontecia durante as seis primeiras horas, onde a estrutura com a fonte de radiação luminosa era ligada e a mesma aquecia todo o sistema. Logo depois era iniciada a segunda etapa, onde a fonte era desligada e por duas horas o sistema entrava numa fase de esfriamento. Ao total o ensaio tinha duração de oito horas e eram analisadas cinco amostras por ensaio. Após finalizado um ensaio era aguardado que a temperatura dos termopares se estabilizasse de acordo com a temperatura da sala, para que fosse possível dar início a um novo ensaio.

Figura 15: Ensaio de desempenho térmico.

Fonte: Autor (2017).

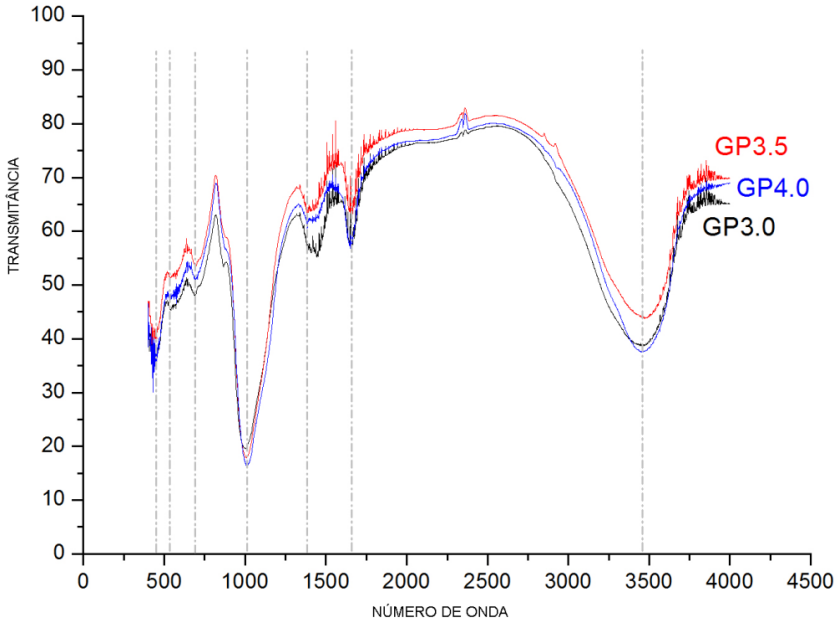
Os dados obtidos eram coletados por uma placa receptora com capacidade de receber a informação de até 16 termopares ao mesmo tempo. A placa era ligada a um computador com um software próprio para leitura e armazenamento das temperaturas obtidas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Ensaio microestrutural FTIR

Os espectros dos geopolímeros GEO3,0, GEO3,5 e GEO4,0 obtidos nos ensaios FTIR são apresentados na Figura 16.

Figura 16: Espectros dos geopolímeros.



Fonte: Santos (2017).

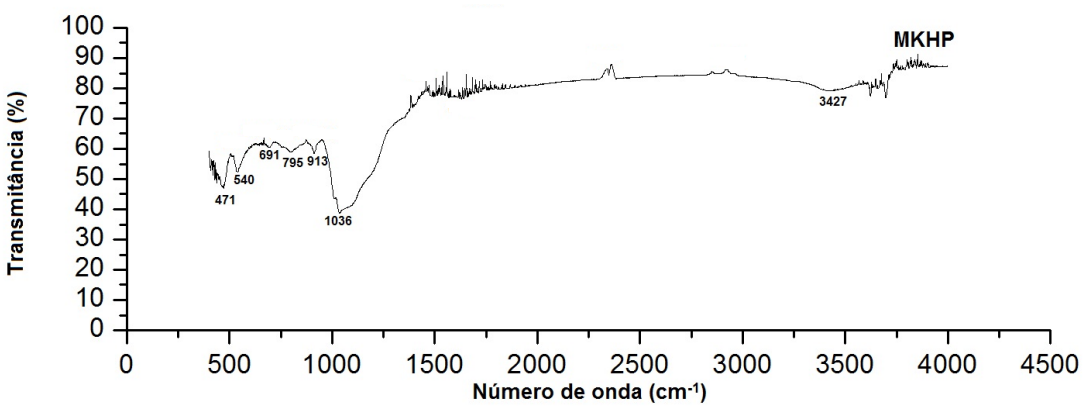
No ensaio de FTIR realizado nas amostras de geopolímeros pode-se perceber que os mesmos tiveram comportamentos semelhantes, onde todos apresentaram uma ampla banda de absorção de aproximadamente 3470 cm^{-1}. Segundo Belmokhtar (2017) esta onda entre 3000 e 3500 cm^{-1} pode ser atribuída à vibração da ligação de água absorvida na superfície ou aprisionada nas cavidades.

Rao (2017) também atribui as bandas de absorção a 3340 cm^{-1}, e a 1440 cm^{-1}, à presença de água livre. Ambas as bandas podem ser verificadas nos espectros dos geopolímeros estudados. Rao (2017) descreve que a banda localizada à 980 cm^{-1} representa as ligações tetraédricas Si-O-Si e Si-O-Al, formando o gel geopolimérico.

Belmokhtar (2017) atribui a banda localizada em 1415 cm^{-1}, ao fenômeno da eflorescência, formação de Na_2CO_3, o que pode justificar o fato dos GEO3,0 terem apresentado o fenômeno, pois em seu espectro nota-se uma maior intensidade dessa banda no GEO3,0 do que nos demais. Tal fenômeno dá-se pela reação do hidróxido de sódio e o CO_2 atmosférico.

Na Figura 17, são apresentados os espectros obtidos no ensaio de FTIR da amostra do metacaulim utilizado para produção dos geopolímeros. A vibração da ligação Si-O-Si e Si-O-Al mostrada nos espectros do Metacaulim localizada a 1036 cm^{-1} foram movidas para 1003 cm^{-1}, 1008 cm^{-1} e 1007 cm^{-1} nos geopolímeros GEO3,0, GEO3,5 E GEO4,0 respectivamente. Tal variação, é observada nos geopolímeros produzidos a partir de metacaulim, e pode ser explicada pela formação de uma nova fase rica em alumínio. (BELMOKHTAR, 2017)

Figura 17: Espectro do metacaulim utilizado.



Fonte: Santos (2017).

5.2 Propriedades Mecânicas

Os ensaios realizados nas amostras dos materiais com argila expandida demonstraram uma fragilidade do material quanto a sua resistência mecânica para algumas finalidades da construção civil. Na Tabela 8 mostra-se os valores obtidos para os ensaios de compressão aos 28 dias, incluindo o coeficiente de variação calculado, que demonstra grandes valores nos resultados obtidos.

Tabela 8: Resistência à compressão das amostras aos 28 dias.

Material	Força máxima (kgf)	Resistência à compressão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
GEO3,0.AE	123,45	0,155	27,12
GEO3,5.AE	115,49	0,145	24,22
GEO4,0.AE	139,4	0,175	26,09
PCI.AE	422,14	0,53	37,91

Fonte: Autor (2017).

As amostras de geopolímero GEO3,0, GEO3,5 e GEO4,0 obtiveram resistência mecânica de respectivamente 3,62, 8,00 e 7,41 MPa, enquanto que os materiais com a argila expandida obtiveram resistências inferiores a 0,2 MPa. Ficou clara a diferença de resistência para o geopolímero puro e o material composto de argila expandida envolta por geopolímero.

Esta perda de resistência dá-se pelo fato, de embora nos cálculos da resistência se considerar a área transversal do material completo (um círculo de raio de 100 mm), a área real a qual o material está sendo solicitado é consideravelmente menor, visto que esta área será apenas composta das ligações entre as argilas expandidas, formadas pelo material aglomerante utilizado. Na Figura 18, é demonstrado em vermelho a área da seção transversal do corpo de prova inteiro, área esta, considerada no cálculo da resistência. Em azul as áreas onde ocorreram a ruptura, sendo assim as áreas que realmente suportaram a força aplicada.

Vale ressaltar ainda a fragilidade dos valores encontrados, devido a carga total aplicada ser menor do que a mínima recomendada nas especificações técnicas da prensa.

Figura 18: Áreas de ruptura e de cálculo.

Fonte: Autor (2017).

O material que possuiu a maior resistência entre os compósitos de geopolímeros foi o GEO4,0.AE, onde o mesmo atingiu 0,175 MPa. Ao contrário do que era esperado de acordo com Yang (2017) e Kim (2017), os geopolímeros neste trabalho estudado não obtiveram maiores resistências ao diminuir a razão Si/Al, porém vale ressaltar que neste trabalho não houve nenhum tratamento térmico nas amostras de geopolímero e a resistência mecânica dos mesmos não foi questão preponderante em sua produção.

Embora tenha atingido o maior valor entre os materiais com argila expandida, a amostra de pasta de cimento possuiu um valor bem abaixo do que o informado pelo fabricante CINEXPAN. O mesmo afirma que o material pode resistir de 3 a 5 MPa, porém vale frisar que a quantidade utilizada neste estudo era apenas a necessária para cobrir a argila expandida, para que as amostras pudessem ser comparadas com geopolímero. A empresa utiliza uma quantidade razoavelmente maior, o que acarreta um aumento da área real do material aglutinante solicitado a compressão.

Percebeu-se também que na amostra de pasta de cimento com argila expandida a ruptura não se deu apenas na pasta de cimento. Conforme pode ser visualizado na Figura 19 a ruptura também chegou a acontecer nas argilas expandidas, o que pode indicar que este material com argila expandida pode não obter maiores resistências mesmo aumentando a quantidade de material aglomerante, pois a argila não suportaria o aumento de tensão.

Figura 19: Ruptura na argila expandida.

Fonte: Autor (2017).

5.3 Densidade

Para análise da densidade do material produzido, primeiramente foram medidas as densidades dos materiais sem argila expandida. Na Tabela 9 pode-se perceber que os geopolímeros obtiveram uma densidade menor do que a pasta de cimento e do que a argamassa utilizada. O geopolímero 3,0 obteve a menor densidade dentre todos os materiais, atingindo por exemplo uma densidade cerca de 16% menor do que a pasta de cimento e cerca de 31% menor do que a densidade da argamassa comum. Já o geopolímero 3,5 obteve a maior densidade dentre os geopolímeros, porém ainda assim obteve uma densidade cerca de 13% menor do que a pasta de cimento e cerca de 28% menor do que a densidade da argamassa comum.

Tabela 9: Densidade dos materiais produzidos.

Material	Densidade (kg/m³)
GEO3,0	1.559,80
GEO3,5	1.631,51
GEO4,0	1.585,24
PCI	1.866,33
ARG	2.266,67

Fonte: Autor (2017).

Esta menor densidade dos geopolímeros também foi verificada nos materiais produzidos com argila expandida. Na Tabela 10 apresenta-se as densidades obtidas nos materiais com argila expandida. O que se pode perceber é que os materiais com argila expandida possuem uma densidade consideravelmente menor do que o material de argamassa comum, chegando a ter uma diminuição de até 76% quando se compara com o material de geopolímero 3,0 com argila expandida. Sendo assim, a argamassa é um material 4 vezes mais pesado do que o GEO3,0.AE.

Tabela 10: Densidade dos materiais para enchimento leve produzidos.

Material	Densidade (kg/m³)
GEO3,0.AE	542,01
GEO3,5.AE	575,98
GEO4,0.AE	561,40
PCI.AE	687,44
ARG	2.242,36

Fonte: Autor (2017).

Embora os materiais com geopolímeros e argila expandida tenham obtido as menores densidades, quando comparados com a pasta de cimento com argila expandida, os mesmos continuam na mesma ordem de grandeza dos materiais puros. As diferenças de densidade para a PCI que eram de 16 e 13% entre GEO3,0 e GEO3,5, respectivamente. Quando na produção dos materiais com argila expandida mudaram para 21 e 16%, da PCI.AE para GEO3,0.AE e GEO3,5.AE respectivamente.

Esta diferença pode ser explicada devido a maior viscosidade apresentada pela pasta de cimento em relação aos geopolímeros.

De toda forma, percebe-se que o grande diferencial na redução dos materiais é a argila expandida, que por muitas vezes utilizada como agregado graúdo leve possui uma densidade aparente de 450 kg/m³.

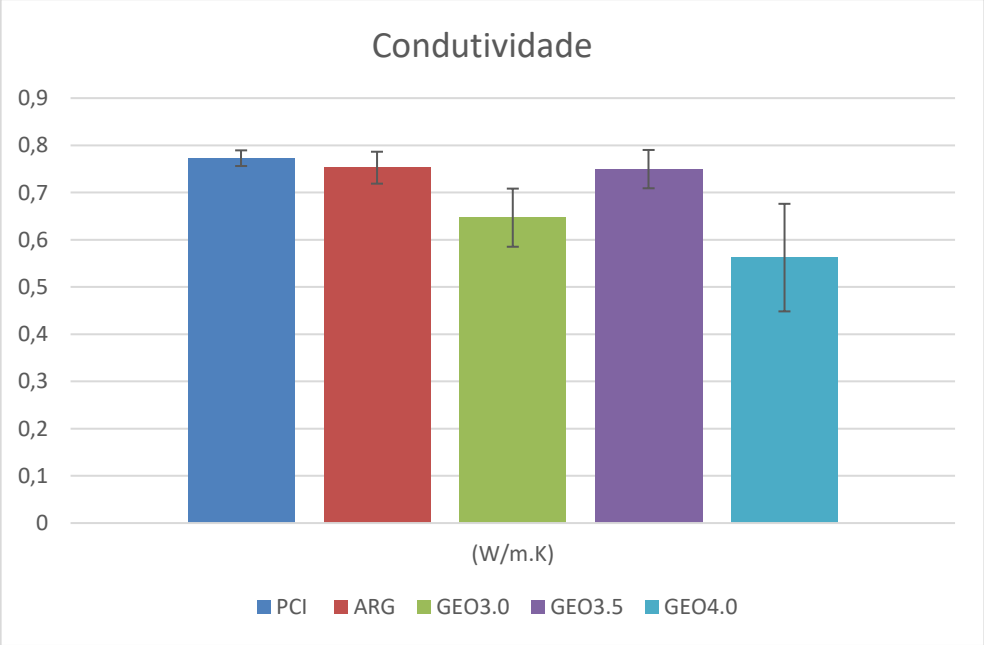
5.4 Propriedades térmicas

Os resultados das propriedades térmicas obtidos através dos ensaios realizados serão demonstrados a seguir graficamente, com seus respectivos valores do desvio padrão.

5.4.1 Condutividade térmica

No Gráfico 1, são apresentados os valores obtidos para a condutividade térmica dos materiais estudados.

Gráfico 1: Condutividade térmica dos materiais estudados.



Fonte: Autor (2017).

No Gráfico 1, é demonstrado que as amostras de geopolímero GEO3.0 e GEO4.0 tiveram uma condutividade térmica menor do que as amostras de PCI e ARG.

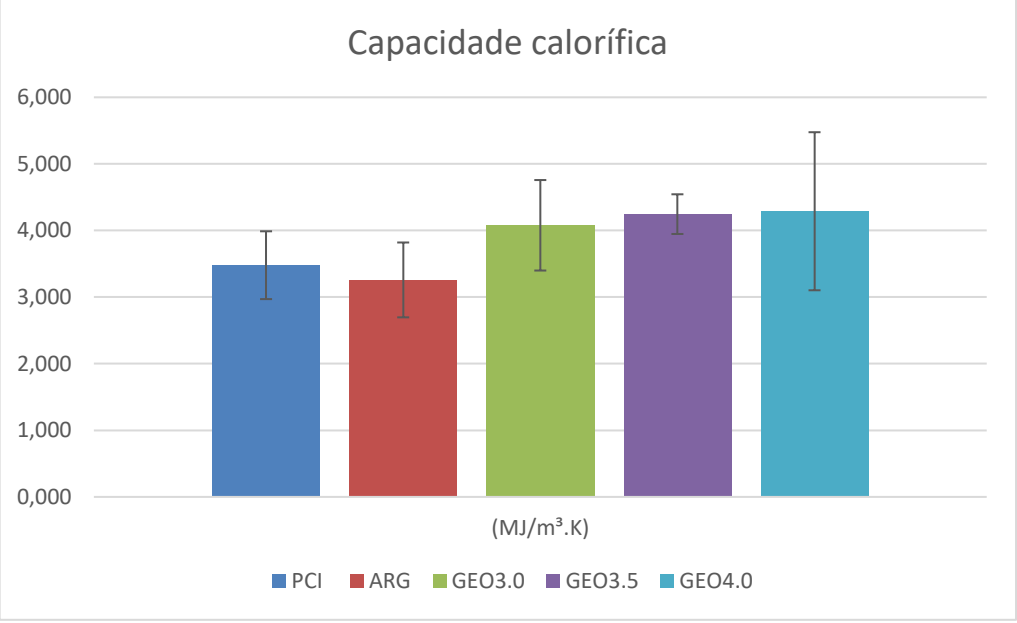
Para a amostra GEO4.0, mesmo sendo cerca de 25 % menor do que as amostras de PCI e ARG, verifica-se um desvio padrão alto. Assim conforme mostra a literatura podemos constatar que o geopolímero possui menor condutividade térmica do que os materiais feitos à base de Cimento Portland Comum.

Os valores encontrados para ARG e PCI estão abaixo do que é apresentado na NBR 15220, onde a mesma atribui uma condutividade de 1,15 W/m.K para argamassa comum. Já o geopolímero obteve uma condutividade um pouco mais baixa do que a explicitada por Shanmugasundaram (2017), onde o mesmo encontrou uma condutividade térmica de 0,910 W/m.K para argamassa geopolimérica, com cura em temperatura ambiente, que foi o caso desta pesquisa.

5.4.2 Capacidade calorífica

No Gráfico 2, são apresentados os valores obtidos para a capacidade calorífica dos materiais estudados.

Gráfico 2: Capacidade calorífica dos materiais estudados.



Fonte: Autor (2017).

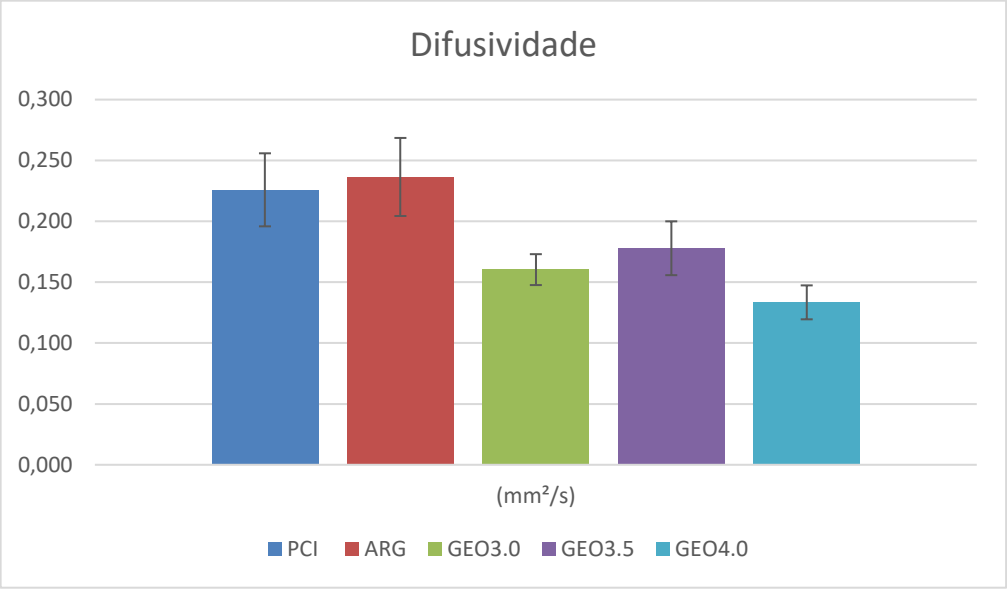
É sabido que quanto maior for a capacidade calorífica de um material maior será seu isolamento térmico. No Gráfico 2, são apresentados os dados de capacidade calorífica. Segundo os dados obtidos, as amostras de geopolímero obtiveram uma

faixa de valores maior do que as de Cimento Portland Comum, possuindo em média uma capacidade calorífica 20% maior. Porém devido ao desvio padrão, apenas podemos afirmar que apenas a amostra GEO3.5 possui uma capacidade calorífica maior do que a amostra ARG.

5.4.3 Difusividade térmica

No Gráfico 3, são apresentados os valores obtidos para a difusividade térmica dos materiais estudados.

Gráfico 3: Difusividade térmica dos materiais estudados.



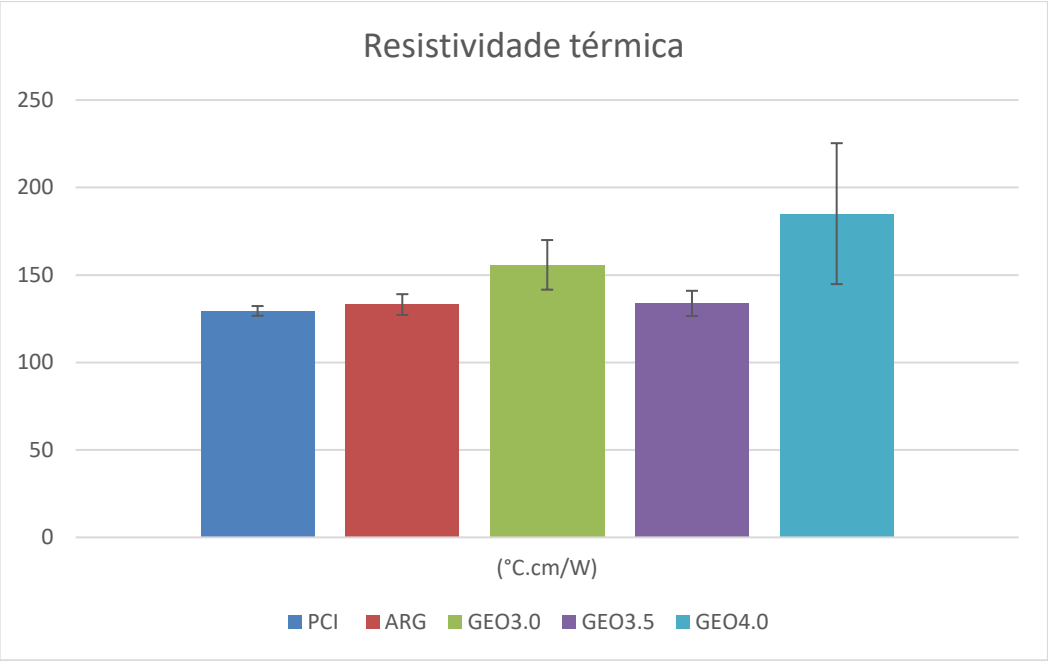
Fonte: Autor (2017).

No Gráfico 3, é demonstrado que as amostras de geopolímero obtiveram valores bem abaixo dos valores encontrados nas amostras dos materiais com Cimento Portland Comum, o que demonstra que o calor se propaga mais lentamente nas amostras de geopolímero do que nas amostras cimentícias. A amostra GEO4.0 apresentou valores consideravelmente menores do que as demais, chegando a ser 40% menor do que, por exemplo, a amostra de ARG.

5.4.4 Resistividade térmica

No Gráfico 4, são apresentados os valores obtidos para a resistividade térmica dos materiais estudados.

Gráfico 4: Resistividade térmica dos materiais estudados.



Fonte: Autor (2017).

Novamente, assim como nas outras propriedades térmicas, as amostras de geopolímero obtiveram valores melhores do que as amostras de Cimento Portland Comum. Destaque para as amostras de GEO3.0 e GEO4.0.

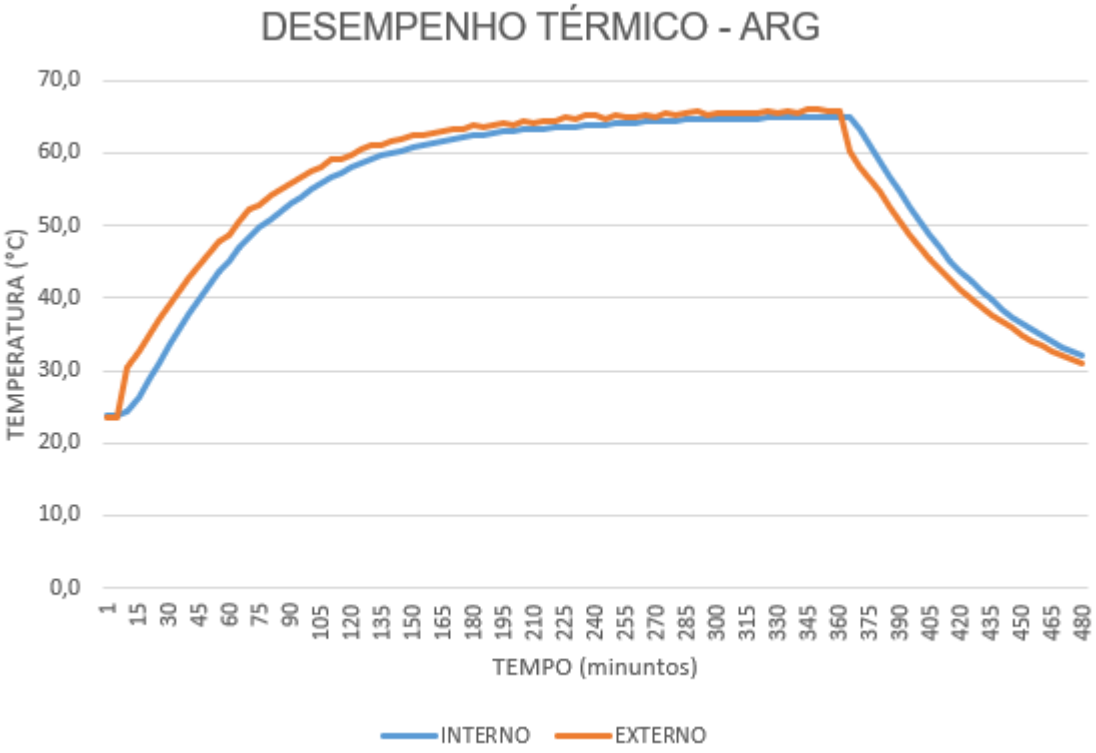
Tal resultado já era esperado pelo fato dos materiais possuírem mesma espessura e a condutividade térmica dos geopolímeros ser menor do que a da pasta de cimento e da argamassa comum.

5.5 Desempenho térmico

Os resultados obtidos durante o ensaio de desempenho térmico foram divididos em 3 partes para cada material sendo a primeira, a análise na fase de aquecimento inicial dos materiais, a segunda parte na fase de estabilização da temperatura e a terceira parte a fase de esfriamento dos materiais.

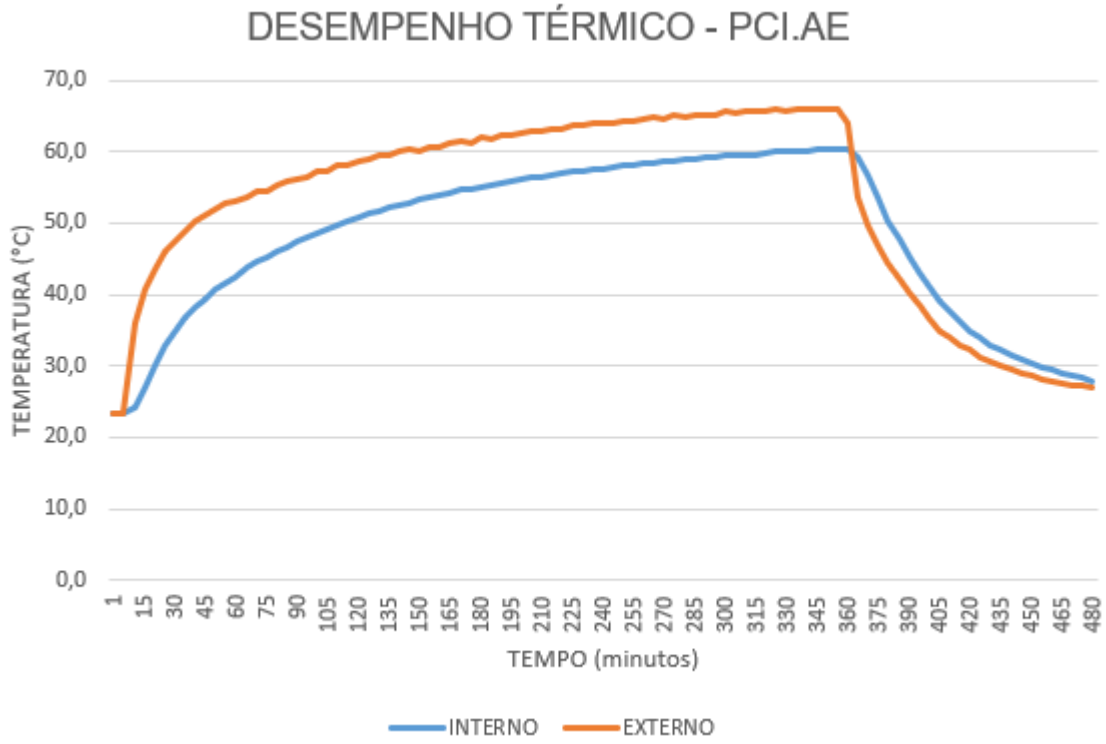
Nos Gráficos 5, 6, 7, 8 e 9 são mostrados os resultados obtidos para cada material ensaiado. Neles são apresentadas as temperaturas medidas nos termopares internos (localizados na face não exposta da placa) e as temperaturas medidas nos termopares externos (localizados na face exposta da placa) em função do tempo de duração do ensaio.

Gráfico 5: Desempenho térmico argamassa de cimento.



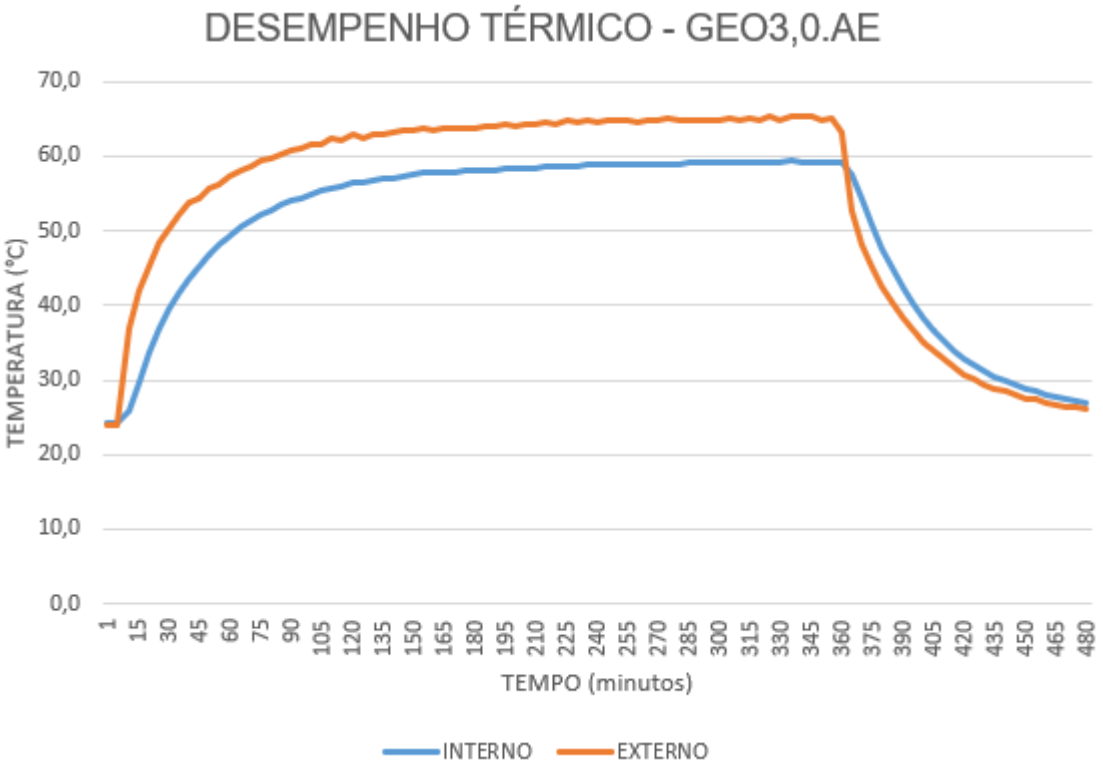
Fonte: Autor (2017).

Gráfico 6: Desempenho térmico pasta de cimento com argila expandida.



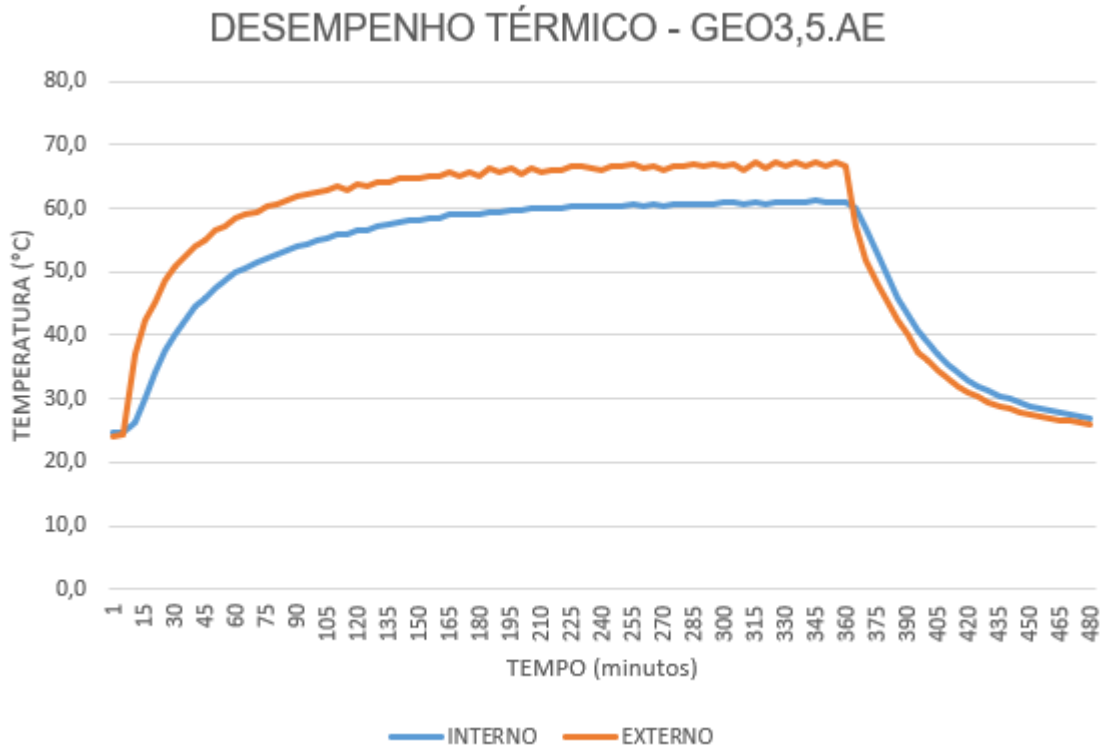
Fonte: Autor (2017).

Gráfico 7: Desempenho térmico geopolímero 3,0 com argila expandida.



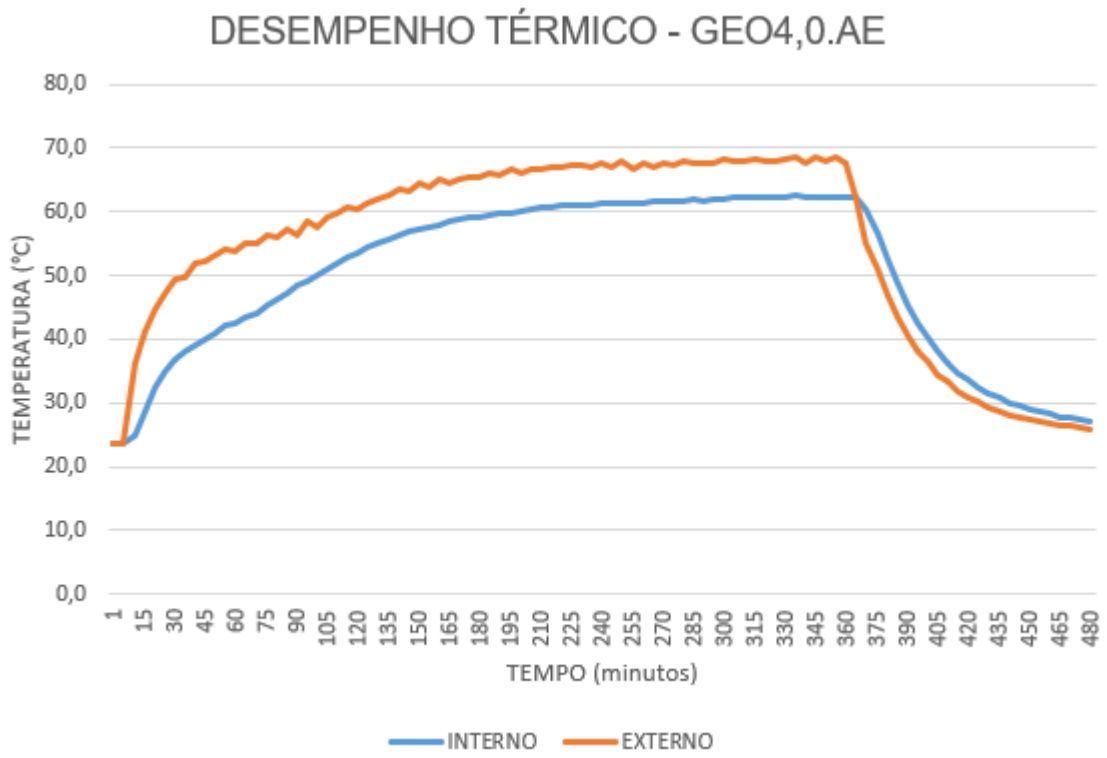
Fonte: Autor (2017).

Gráfico 8: Desempenho térmico geopolímero 3,5 com argila expandida.



Fonte: Autor (2017).

Gráfico 9: Desempenho térmico geopolímero 4,0 com argila expandida.



Fonte: Autor (2017).

De acordo com estes dados, observam-se diferenças de comportamento entre a ARG e as demais amostras. Os resultados obtidos durante o ensaio de desempenho térmico foram divididos em 3 partes para cada material, sendo a primeira a análise na fase de aquecimento inicial dos materiais, a segunda parte na fase de estabilização da temperatura e a terceira parte a fase de esfriamento dos materiais. Para cada fase foram identificadas as temperaturas e o comportamento das amostras.

Para a fase de aquecimento inicial, fase essa medida na primeira hora de ensaio, logo se percebe que as temperaturas obtidas no termopar interno da ARG são muito próximas das temperaturas obtidas no termopar externo, o que já não acontece nos materiais que possuem argila expandida. Na Tabela 11, é demonstrado a variação de temperatura existente entre os termopares internos e externos para todas as amostras no tempo de 10, 30 e 60 minutos.

Tabela 11: Variação de temperatura entre termopares externos e internos durante a primeira hora de ensaio.

Amostra	Variação de temperatura (°C)		
	10 minutos	30 minutos	60 minutos
ARG	6,1	5,7	3,5
PCI.AE	11,8	12,6	10,5
GEO3,0.AE	11,0	10,7	8,0
GEO3,5.AE	10,8	10,6	8,7
GEO4,0.AE	11,3	12,4	11,3

Fonte: Autor (2017).

Após decorrida uma hora de ensaio, a diferença de temperatura entre a face externa e interna da placa de argamassa de cimento é de apenas 3,5 °C, o que demonstra a ineficiência do material em ser um isolante térmico. Levando em consideração que a temperatura na face externa em uma hora de ensaio era de 48,7 °C, a placa isolou apenas 7,2% da temperatura.

Enquanto isso os materiais que contém argila expandida possuem um poder de isolamento térmico notoriamente maior. Destaque para o GEO4,0.AE, que após passado uma hora de ensaio, a placa consegue diminuir 11,3 °C a temperatura de sua face interna em relação a sua face externa. Como em sua face externa em uma hora de ensaio, sua temperatura que era de 53,7 °C, a placa conseguiu isolar 21% da inicial.

Importante ressaltar que a amostra de PCI.AE também obteve resultado significativo, possuindo um isolamento maior do que as amostras GEO3,0.AE e GEO3,5.AE.

As fases de estabilização da temperatura das amostras foram bem divergentes entre os materiais produzidos com geopolímero e os materiais produzidos a base de cimento. Como o gráfico dos desempenhos térmicos das amostras é dado de 15 em 15 minutos, na Tabela 12 demonstra-se para qual intervalo de 15 minutos a temperatura da face externa de cada amostra apresenta uma certa estabilização da temperatura medida, além de informar a maior temperatura obtida ao longo de todo ensaio.

Tabela 12: Intervalo de tempo necessário para estabilização das temperaturas nos termopares externos.

Amostra	Intervalo de tempo (minutos)	Temperaturas (°C)	Variação (°C)	Temperatura máxima obtida (°C)
ARG	225 - 240	64,9 - 65,1	0,2	65,8
PCI.AE	300 - 315	65,6 - 65,8	0,2	66,1
GEO3,0.AE	195 - 210	64,2 - 64,3	0,1	65,4
GEO3,5.AE	180 - 195	66,2 - 66,3	0,1	67,2
GEO4,0.AE	240 - 255	67,6 - 67,7	0,1	68,7

Fonte: Autor (2017).

Pela Tabela 12 fica visível que a amostra PCI.AE foi a que apresentou um maior tempo para obter uma estabilização de sua temperatura, porém esta pequena estabilização ocorreu somente após o período de 315 minutos e levando-se em consideração que aos 360 minutos sua temperatura era de 66,1 °C, percebe-se que em 45 minutos a amostra ainda aumentou 0,3 °C. Tal fato demonstra que a amostra ainda não havia chegado a sua temperatura total. As amostras de geopolímero GEO3,0.AE e GEO3,5.AE obtiveram uma estabilização de sua temperatura em cerca de 195 minutos de ensaio.

Tal resultado não condiz com as propriedades térmicas do material, pois a difusividade térmica, propriedade que define a velocidade de propagação do calor, dos materiais geopoliméricos foi menor do que as dos materiais de cimento, o que indicaria que os geopolímeros deveriam demorar mais para estabilizar sua temperatura.

A diferença de temperatura obtida entre a face externa e interna de cada amostra é apresentada na Tabela 13, onde a mesma apresenta a maior temperatura externa, a maior temperatura interna e a porcentagem de temperatura reduzida pela placa ensaiada.

Tabela 13: Porcentagem de temperatura reduzida pelas placas.

Amostra	Temperatura máxima externa (°C)	Temperatura máxima interna (°C)	Redução de temperatura (%)
ARG	65,8	65,0	1,22
PCI.AE	66,1	60,3	8,80
GEO3,0.AE	65,4	59,3	9,30
GEO3,5.AE	67,2	61,2	8,90
GEO4,0.AE	68,7	62,5	9,00

Fonte: Autor (2017).

Na Tabela 13 fica clara a eficiência do isolamento térmico dos materiais compostos de argila expandida quando comparados a argamassa comum de cimento, onde em média conseguiram isolar cerca de 9% da temperatura enquanto a placa de argamassa conseguiu isolar apenas pouco mais de 1%.

Detalhe para as placas de geopolímero, que como esperado obtiveram melhor isolamento térmico, devido às propriedades térmicas encontradas nos geopolímeros. Porém a diferença para a PCI.AE é muito pequena, o que nos faz entender que o grande diferencial realmente é a argila expandida, o que é justificável, pois enquanto a condutividade térmica da argila expandida é de 0,16 W/m.K, as dos geopolímeros e pasta de cimento estão na ordem de 0,45 a 0,8 W/m.K. Já a argamassa apresentou a maior condutividade térmica, próximo a 0,8 W/m.K e também o pior desempenho térmico.

Durante a fase de resfriamento que se deu após 6 horas de ensaio, entre os 360 e 480 minutos, as temperaturas iniciais e finais (de resfriamento) foram medidas conforme demonstrado na Tabela 14.

Tabela 14: Temperaturas durante fase de resfriamento.

Amostra	Temperatura externa inicial (°C)	Temperatura externa final (°C)	Temperatura interna inicial (°C)	Temperatura interna final (°C)
ARG	65,8	31,1	65,0	32,00
PCI.AE	66,1	26,9	60,3	28,00
GEO3,0.AE	65,4	26,2	59,3	27,00
GEO3,5.AE	67,2	26,0	61,2	27,00
GEO4,0.AE	68,7	26,0	62,5	27,20

Fonte: Autor (2017).

Na Tabela 14 pode-se perceber que as amostras de geopolímeros, assim como obtiveram uma estabilização mais cedo da temperatura total, elas também tendem a esfriar e voltar a temperatura ambiente com maior velocidade do que as amostras de cimento, o que novamente não condiz com os resultados obtidos na propriedade de difusividade térmica.

6 CONCLUSÃO

Os ensaios de FTIR realizados nos geopolímeros estudados demonstraram a formação geopolimérica, a influência do metacaulim nos geopolímeros e também apontaram uma possível presença do fenômeno da eflorescência, principalmente no geopolímero com razão SiO_2/Al_2O_3 = 3,0. Tal fenômeno foi perceptível após produção do geopolímero e pode ter influenciado entre outros em sua resistência mecânica à compressão.

Em geral os materiais geopolímericos puro apresentaram menor densidade do que os materiais cimentantes, porém a densidade dos materiais obtidos pela mistura de geopolímero com argila expandida apresentou uma densidade cerca de 4 vezes menor do que a densidade da argamassa comum.

As resistências mecânicas dos materiais com argila expandida não obtiveram valores aceitáveis para a utilização do material em situações onde o mesmo seja solicitado por cargas como contrapiso, alvenaria, movimentações entre outros elementos. O geopolímero com razão SiO_2/Al_2O_3 = 4,0 obteve os maiores resultados entre os geopolímeros, ao contrário do que era de se esperar. Já a pasta de cimento obteve valores superiores aos geopolímeros, porém também não conseguiu resultado suficientemente satisfatório.

As propriedades térmicas de condutividade térmica, capacidade calorífica, difusividade térmica e resistividade térmica dos geopolímeros foram todas melhores do que as propriedades térmicas encontradas para os materiais feitos de pasta cimento e argamassa comum. De uma forma geral o gepolímero com razão SiO_2/Al_2O_3 = 4,0 obteve os melhores resultados, embora o mesmo tenha apresentado um alto desvio padrão.

O desempenho térmico das placas ensaiadas comprovaram o que as propriedades térmicas já haviam apontado, pois os materiais obtidos pelas misturas de geopolímero com argila expandida obtiveram o melhor desempenho térmico, conseguindo um isolamento maior da temperatura existente na face exterior para a face interior. Porém, a pasta de cimento com argila expandida também apresentou bom isolamento térmico quando comparado com os resultados obtidos pela argamassa comum, o que demonstra que o principal responsável pelo isolamento térmico na verdade foi a argila expandida, o que já era de se esperar devido a sua

baixa condutividade térmica quando comparada tanto aos geopolímeros quanto à pasta de cimento e argamassa.

De uma forma geral as diferentes razões de SiO_2/Al_2O_3 dos materiais geopoliméricos não geraram grandes diferenças nos resultados obtidos. Contudo, deve-se evitar o geopolímero utilizado neste trabalho com razão $SiO_2/Al_2O_3 = 3,0$, pelo fato do mesmo ter apresentado uma grande incidência de eflorescência, o que com prometeu entre outros o seu desempenho mecânico.

Diante do exposto, o material estudado possui grande potencial quanto ao seu uso como isolante térmico nas construções, seja em cima de telhados, lajes, ou como material de preenchimento de blocos de alvenaria, lajotas, entre outros. Porém, desde que o mesmo não tenha necessidade de suportar cargas pois este material apresentou baixa resistência.

7 PERSPECTIVAS

Devido ao fato do material composto por geopolímero e argila expandida não ter sido anteriormente estudado, e visto que, a composição deste material pode variar de diversas formas, como por exemplo a razão SiO_2/Al_2O_3 do geopolímero, a razão geopolímero / argila expandida, e a granulometria da argila expandida, existem diversos estudos possíveis de serem realizados a fim de encontrar novas aplicações para este material. Onde podem-se destacar:

- Estudo do desempenho acústico do material;

- Desenvolvimento do material, preenchendo-o totalmente com material aglomerante, e não apenas cobrindo-o;

- Desenvolvimento de concreto estrutural leve a partir do geopolímero como aglomerante e argila expandida como o agregado graúdo;

- Desenvolvimento de material mais resistente a partir de novos geopolímeros produzidos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho – Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 15575-3**: Edificações habitacionais – Desempenho – Requisitos para os sistemas de pisos. Rio de Janeiro, 2012.

ASTM C330/330M, **Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete**, ASTM International, West Conshohocken, PA, US, 2014.

ATAHAN, H. N., Dilli, M. E., Şengul, C. **A comparison of strength and elastic properties between conventional and lightweight structural concretes designed with expanded clay aggregates.** Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, 2015.

AZEVEDO, C. C. A. **Estudo de comportamento térmico de compósito à base de gesso e vermiculita.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2017.

BELMOKHTAR, N., Ammari, M., Brigui, J., Allal, L. B., **Comparison of the microstructure and the compressive strength of two geopolymers derived from Metakaolin and a industrial sludge.** University Abdelmalek Essaadi, Faculty of Sciences and Techniques of Tangier, Tangier, Marocco, 2017.

BEZERRA, L. A. C. **Análise do desempenho térmico de sistema construtivo de concreto com EPS como agregado graúdo.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2003.

BORGES, J. G. K. **Análise das propriedades acústicas de contrapisos produzidos com materiais reciclados**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

BORGES, P. H. R., Banthia, N., Alcamand, H. A., Vasconcelos, W. L., Nunes, E. H. M. **Performance of blended metakaolin/blastfurnace slag álcali-activated mortars**. Federal Centre for Tech, Education of Minas Gerais – CEFET-MG, Belo Horizonte, Brasil, 2016.

CINEXPAN Argila Expandida. Disponível em <http://www.cinexpan.com.br/enchimento-leve-rigido.html>. Acesso em: 08 de mar. 2017.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer: Inorganic Polymeric New Materials**. Journal of Thermal Analysis, Vol. 37, 1991.

DAVIDOVITS, J. **Properties of geopolymer cements. Geopolymer Institute**. 02100 Saint-Quentin, France, 1994.

DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral. **Economia Mineral**: Sumário Mineral 2012. Vol. 32. Disponível em http://www.dnpm.gov.br/. Acesso em: 09 de fev. de 2017.

DUAN, P., Song, L., Yan, C., Ren, D., Li, Z. **Novel thermal insulating and lightweight composites from metakaolin geopolymer and polystyrene particles.** China University of Geosciences, Wuhan, Vhina, 2017.

EME Indústria de EPS. Itapecerica da Serra – SP. Disponível em http://www.emecomercial.com.br/eps-construcao-civil-preco. Acesso em 09 de jan. de 2018.

FANTILLI, A. P., Chiaia, B., Gorino, A. **Ecological and mechanical assessment of lightweight fiber-reinforced concrete made with rubber or expanded clay aggregates.** Department of Structural, Building and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Torino, Italy, 2016.

HELMY, A. I. I. **Intermittent curing of fly ash geopolymer mortar**. Civil Engineering Department, The British University in Egypt, Cairo, Egypt, 2016.

JIMÉNEZ, A. F., Martin, A., Pastor, J. Y., Palomo A. **Mechanical behaviour at high temperature of alkali-activated aluminosilicates (geopolymers)**. Eduardo Torroja Institute for Construction Science, Madrid, Spain, 2015.

KIM, G., Lee, B., Kim R., Cho, B., Lee, S., Chon, C., **Strength development properties of geopolymer paste and mortar with respect to amorphous Si/Al ratio of fly ash.** Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea, 2017.

KUMAR, S. **Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization.** CSIR–National Metallurgical Laboratory, India, 2012.

LACH, M., Korniejenko, K., Mikula, J., **Thermal insulation and thermally resistant materials made of geopolymer foams.** Cracow University of Technology, Cracow, Poland, 2016.

LEONG, K. Y., Razali, I., Ahmad K. Z. K., Ong, H. C., Ghazali, M. J., Rahman, M. R. A. **Thermal conductivity of an ethylene glycol/water-based nanofluid with copper-titanium dioxide nanoparticles: An experimental approach**. Universiti Pertahanan Nasional Malaysia, Malaysia, 2017.

MACKENZIE, K. J. D., O'Leary, B.G. **Inorganic polymers (geopolymers) as precursors for carbothermal reduction and nitridation (CRN) synthesis of SiAlON ceramics**. Journal of the European Ceramic Society, 2015.

MARQUES, F. M. **A importância da seleção dos materiais de construção para a sustentabilidade ambiental do edifício**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) Universidade Federal do Rio de Janeiro, PROARQ, Rio de Janeiro, 2007.

NEMATOLLAHI, B., Ranade, R,. Sanjayan, J., Ramakrishnan, S. **Thermal mechanical properties of sustainable lightweight strain hardening geopolymer composites.** Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia, 2017.

OLIVEIRA, M. C. R. **Compósito de poliuretano de mamona e resíduo industrial para isolação térmica e absorção sonora**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

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

RANGAN, B. V., Wallah S.E. **Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties**. Curtin University of Technology, Perth, Australia, 2006.

RAO, F., Song, S., Wan, Q., Cholico-González, D. F., Ortiz, N. L., **Combination formation in the reinforcement of metakaolin geopolymers with quartz sand.** Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México. Wuhan University of Technology, Wuhan, China, 2017.

RICKARD, W. D. A., Gluth, G. J. G., Pistol, K. **In-situ thermo-mechanical testing of fly ash geopolymer concretes made with quartz and expanded clay aggregates**. Curtin University, Perth, Australia, 2016.

SANTOS, F. A. **Estudo da variação da relação SiO_2/Al_2O_3 na produção de geopolímeros para imobilizar contaminantes.** Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.

SARKER, P. K., Mcbeath, S. **Fire endurance of steel reinforced fly ash geopolymer concrete elements**. Curtin University, Perth, Australia, 2015.

SCHNEIDER, U., Schneider M., **An advanced transiente concrete model for the determination of restraint in concrete estructures subjected to fire**. J.Adv. Concrete Technology, 2009.

SHANMUGASUNDARAM, A. N. P. **An experimental investigation on flyash-based geopolymer mortar under diferente curing regime for thermal analysis.** <![CDATA[Energy & Buildings]]> (2016), http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.079

SINGH, N. B.; Okoye, F. N.; Dugarprasad, J. **Mechanical properties of alkali activated flyash/Kaolin based geopolymer concrete.** Shardar University, Greater Noida, India, 2015.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Relatório Anual**. Rio de Janeiro: SNIC, 2012. Disponível em: http://www.snic.org.br/pdf/snic-relatorio2012-12_web.pdf.

SOUZA FILHO, J. R. **Obtenção e caracterização de um eco-compósito à base de látex e bainha da palha do coqueiro para isolamento térmico e acústico**. Tese

(Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

TESSARI, J. **Utilização de poliestireno expandido e potencial de aproveitamento de seus resíduos na construção civil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

VELOSA, J. C., Fangueiro R., Mendonça P. **Estudo das propriedades térmicas de materiais fibrosos aplicados em paredes divisórias leves.** Centro do território, Ambiente e Construção Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2013.

YANG, E., Lahoti, M., Wong, K. K., Tan, K. H. **Use of alkali-silica reactive sedimentar rock powder as a resource to produce high strength geopolymer binder.** School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore, 2017.

ZHANG, Z., Provis, J. L., Reid, A. Wang, H. **Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete**. University of Southern Queensland, Toowoomba, Australia, 2015.