

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

JULIANO MOREIRA LEITE

A INFLUÊNCIA DA VERMICULITA EM ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA COM
ADIÇÃO DE NANOTITÂNIA

Joinville

2016

JULIANO MOREIRA LEITE

A INFLUÊNCIA DA VERMICULITA EM ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA COM
ADIÇÃO DE NANOTITÂNIA

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Infraestrutura no curso de Engenharia de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Joinville.

Orientador: Dr. Luciano Senff

Joinville
2016

AGRADECIMENTOS

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

Ao Prof. Dr. Luciano Senff pelo auxílio na orientação, sempre solicito quando procurado e muito presente quando foi preciso. Também agradeço pela oportunidade de ingressar no mundo da pesquisa e abrir precedentes para continuar nesta área.

Ao núcleo de Pesquisas em Materiais Cerâmicos e Compósitos (CERMAT) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Ao departamento de Engenharia Civil do Centro Universitário – Católica de Santa Catarina, unidade Joinville.

À minha tia Ivonete pela ajuda no meu início da atividade acadêmica, e ao meu primo Dirceu que sempre me incentivou muito.

A todos os amigos que fiz durante estes anos Rafael, Jonas, Leonel, Ricardo e Julio, que em vários momentos me ajudaram, e também pelos momentos de descontração.

Aos colegas de laboratório Eduardo, Priscila, Tuany e Raissa que estiveram presentes em vários momentos auxiliando quando possível.

Aos meus irmãos Lucas e Ana Julia pelos momentos de descontração, amor e atenção que me foi dado pelos mesmos.

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

*“ Seja a mudança
que você deseja ver no mundo”
Mahatma Gandhi*

RESUMO

A busca por materiais que gerem menos danos ao ambiente para sua obtenção, fez com que fossem desenvolvidas novas alternativas ao cimento Portland. O geopolímero é um material que gera menos resíduos para sua obtenção, reduzindo em até 90% a redução de emissão de CO₂ ao meio ambiente quando comparado a produção de clínquer, que é a matéria prima para obtenção do cimento Portland. Por esta razão os materiais geopoliméricos estão ganhando mais espaço em pesquisas e aplicações com concretos e argamassas multifuncionais geopoliméricas. Os geopolímeros são materiais constituídos por aluminossilicatos na forma amorfa ou semi-cristalina que são ativadas via solução alcalina e cujo processamento pode ser realizado a temperatura ambiente. Neste trabalho foi utilizado como fonte de aluminossilicato o metacaulim, enquanto o hidróxido de sódio (NaOH) foi utilizado como solução ativadora alcalina. Foram feitas adições de agregados leves como forma de se obter resultados das propriedades no estado fresco e endurecido da argamassa geopolimérica até os 28 dias de cura, e avaliados os aspectos físicos das amostras. Os resultados obtidos foram avaliados e tiveram características interessantes, e propriedades até melhores que argamassas feitas com cimento Portland. Obteve-se uma redução na densidade aparente de 33% em relação a amostra de referência com a amostra com 15% de vermiculita. Foi obtido uma resistência a compressão média de 21,35 MPa para referência aos 28 dias de cura bem como 3,15 MPa para a formulação com 10% de vermiculita, este último permite a aplicação da argamassa em blocos de alvenaria de construção civil. Os objetivos propostos foram alcançados e a produção e utilização de uma argamassa geopolimérica pode virar uma tendência com o tempo devido sua produção sustentável e os resultados obtidos.

Palavras-Chave: Geopolímeros. Metacaulim. Argamassas multifuncionais.

ABSTRACT

The search for materials that generate less damage to the environment to obtain them, has developed new alternatives to Portland cement. The geopolymer is a material that generates less waste to obtain it, reducing the reduction of CO₂ emission to the environment by up to 90% when compared to the production of clinker, which is the raw material to obtain the Portland cement. For this reason geopolymeric materials are gaining more space in research and applications with geopolymer multifunctional concretes and mortars. Geopolymers are materials consisting of amorphous or semi-crystalline aluminosilicates which are activated by alkaline solution and whose processing can be carried out at room temperature. In this project will be used as the source of aluminosilicate metakaolin, while sodium hydroxide (NaOH) will be used as alkaline activating solution. Addition of light aggregates will be done as a way of obtaining results of the properties in the fresh and hardened state of the geopolymer mortar up to 28 days of cure, to evaluate the physical and chemical aspects of the samples. The obtained results were evaluated and had interesting characteristics, and properties even better than mortars made with Portland cement. A reduction in apparent density of 33% over the reference sample was obtained with the 15% vermiculite sample. An average compressive strength of 21.35 MPa was obtained for reference to the 28 days of cure as well as 3.15 MPa for the formulation with 10% of vermiculite, the latter allows the application of the mortar in blocks of masonry of civil construction. The proposed objectives were achieved and the production and use of a geopolymer mortar can become a trend over time due to its sustainable production and the results obtained.

Keywords: geopolymer, metakaolin, multifunctional mortars.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Aeroporto Brisbane West Wellcamp, Austrália.....	18
Figura 2: a) Coordenação tetraédrica de geopolímero com compartilhamento de todos os oxigênios com a presença do cátion K ⁺ ; b) Estrutura proposta para o polímero Na-polissialato.....	19
Figura 3: Estrutura das fases de TiO ₂ : (a) anatásio; (b) rutilo; (c) brookite.....	22
Figura 4: Esquema representativo da partícula de um semiconductor. BV: banda de valência; BC: banda de condução.....	23
Figura 5: (a) Difração de Raio-X do Metacaulim; (b) Distribuição granulométrica do Metacaulim.....	26
Figura 6: Matéria prima Metacaulim	26
Figura 7: Cinza de casca do arroz (CCA).....	27
Figura 8: a) Hidróxido de sódio (NaOH), b) Solução ativadora pronta.	28
Figura 9: a) Aeroxide TiO ₂ P25, embalagem com 250g; b) Nanotitânia.....	28
Figura 10: Distribuição Granulométrica da Areia.....	29
Figura 11: Areia usada para a produção das argamassas geopoliméricas.....	29
Figura 12: a) vermiculita expandida fina utilizada para a produção das argamassas geopoliméricas; b) curva granulométrica da vermiculita.....	30
Figura 13: a) molde para confecção dos corpos de prova; b) nivelador de camadas; c) régua metálica.....	32
Figura 14: a) Contador de Golpes Automático; b) Mesa de adensamento por queda para argamassas.....	32
Figura 15: a) mesa para realização do FTT; b) molde tronco cônico; c) soquete; d) espátula para preenchimento do molde; e) espátula para rasar molde.....	33
Figura 16: a) aparato para ensaio de Arquimedes; b) pesagem submersa; c) pesagem de superfície saturada.....	34
Figura 17: (a) máquina de carga universal; (b) dispositivo para ensaio de compressão; (c) dispositivo para ensaio de flexão.	35
Figura 18: Resultados do Flow Table Test.	37
Figura 19: a) formulação de referência 0% de VER; b) 5% VER; c) 7,5% VER; d) 10% VER; e) 15% VER.	37

Figura 20: Comparativo de densidade aparente para corpos de prova com 7 e 28 dias de cura.	38
Figura 21: Comparativo de porosidade aberta para corpos de prova com 7 e 28 dias de cura.	39
Figura 22: Comparativo de absorção de água para corpos de prova com 7 e 28 dias de cura.	40
Figura 23: Resultados das propriedades mecânicas: a) flexão e b) compressão para corpos de prova até 28 dias de cura.	41
Figura 24: Relação entre resistência a compressão e densidade aparente aos 28 dias de cura.	42
Figura 25: Relação entre resistência a compressão e porosidade aberta aos 28 dias de cura.	43
Figura 26: Relação entre resistência a compressão e absorção de água aos 28 dias de cura.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos tipos de argamassas. (NBR 13 281, 2005).....	17
Tabela 2 – Composição química do Metacaulim determinada por FRX.....	26
Tabela 3 - Composição química da sílica de casca de arroz	27
Tabela 4 – Propriedades físicas da nanotitânia.....	28
Tabela 5: Características técnicas da Vermiculita Expandida	30
Tabela 6: Composição das Formulações utilizadas	36

LISTA DE ABREVIATURAS

nT	Nanotitânia
REF	Referência
TiO ₂	Dióxido de Titânia
VER	Vermiculita
ρ_{ap}	Densidade Aparente
A_{H_2O}	Absorção de Água
P_{ab}	Porosidade Aberta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	ARGAMASSA MULTIFUNCIONAL	15
2.1.1	Definições e Aplicações	15
2.1.2	Propriedades no Estado Fresco	16
2.1.3	Propriedades no Estado Endurecido	16
2.2	GEOPOLÍMEROS	17
2.2.1	Metacaulim	19
2.2.2	Ativador Alcalino - Hidróxido de Sódio	20
2.3	CINZA DA CASCA DE ARROZ	21
2.4	NANOTITÂNIA ($n\text{TiO}_2$)	22
2.4.1	Fotocatálise Heterogênea com TiO_2	22
2.5	AGREGADO LEVE - VERMICULITA	23
3	METODOLOGIA	25
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	25
3.1.1	Argamassa Geopolimérica	25
3.2	PREPARO DAS ARGAMASSAS	30
3.2.1	Moldagem dos corpos de prova	31
3.2.2	Flow Table Test (FTT)	32
3.3	ENSAIO NO ESTADO ENDURECIDO	33
3.3.1	Propriedades Físicas	33
3.3.2	Propriedades Mecânicas	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1	TRABALHABILIDADE	36
4.2	DENSIDADE APARENTE	38
4.3	POROSIDADE ABERTA	39
4.4	ABSORÇÃO DE ÁGUA	40

4.5	RESISTÊNCIA A FLEXÃO E COMPRESSÃO	41
5	CONCLUSÃO.....	44
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	45
	REFERÊNCIAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é o aglomerante mais utilizado na fabricação de concretos e argamassas. Em 2013 foi produzido o equivalente a 4 milhões de toneladas de cimento em todo mundo (CIMENTO NO MUNDO, 2014) e segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) foram produzidas 71,250 mil toneladas no Brasil.

Apesar de ser fundamental para o desenvolvimento da sociedade, hoje em dia a produção de cimento é vista como um vilão para a sustentabilidade do meio ambiente. Para cada tonelada de cimento produzido há uma geração aproximada de 0,95 tonelada de CO₂, o que faz esse material ser considerado altamente poluente. (MACCARINI, 2015).

Contudo, com o avanço da tecnologia, produtos alternativos estão sendo pesquisados e surgem no mercado com o intuito de substituir o cimento Portland e reduzir o dano causado ao meio ambiente, entre as quais está o geopolímero.

A matriz geopolimérica é um exemplo de material alternativo amplamente empregado na construção civil, seja na forma de acabamento como argamassas ou até concretos de alta resistência empregados em pistas de aeroportos. Os geopolímeros tem sua ativação por meio de Si e Al, diferente dos cimentos álcali ativados que contém materiais como Si e Ca.

Com o avanço da tecnologia, outros materiais estão sendo incorporados nas matrizes geopoliméricas de modo a se obter um material multifuncional, esse material é produzido através de resíduos industriais com o objetivo de melhorar suas propriedades, como a resistência a trincas, térmica, acústica, redução de peso e também na redução de CO₂ do ambiente onde é aplicada. Esses materiais podem ser incorporadores de ar, fibras, nanotitânia, entre outros.

O uso de agentes formadores de poros em matrizes geopoliméricas são ainda recentes, o que enfatiza a importância deste tema. Existem alguns materiais incorporadores de ar (vermiculita, perlita, diatomita) já no mercado, embora estes

sejam normalmente empregados em argamassas e concretos leves sem fins estruturais.

A vermiculita expandida trata-se de uma argila expandida amplamente utilizada também na agricultura já que esta tem como característica a retenção de água, sendo assim de grande valia a aplicação da mesma em regiões de maior temperatura e solos arenosos. Esta mesma característica é interessante para a construção civil, pois, a produção de argamassa com a adição da vermiculita expandida faz com que primeiramente tenhamos a retenção de líquido na mesma e conforme este evapora com o tempo, temos a incorporação de ar, que traz propriedades como aumento de resistência termoacústica e redução de peso específico.

Na busca por materiais sustentáveis estão sendo desenvolvidos produtos com propriedades capazes de purificar o ambiente ao seu redor, o dióxido de titânia (TiO_2), por exemplo, é um material fotocatalítico e atua com o objetivo de purificação do ambiente onde é empregado, reduzindo níveis de CO_2 , e outros contaminantes. O estudo da sua utilização em argamassas ainda é recente e tem sua função melhorada quando se consegue aplica-la na superfície, com o avanço em suas pesquisas poderá ser aplicada futuramente em grandes obras de infraestrutura como pontes, rodovias, entre outros.

Outro tema que vem sendo estudado, é a utilização de resíduos industriais que não possuem um descarte adequado ambientalmente, sejam eles resíduos da indústria metal mecânica, alimentícia ou construção civil. Entre estes temos a cinza da casca do arroz (CCA). A queima da casca do arroz acontece com a finalidade de geração de energia/calor, e seu resíduo a cinza é rico em sílica. Esta é de grande interesse na produção dos geopolímeros, já que a matéria prima utilizada para sua produção nem sempre é de boa qualidade e necessita de um acréscimo de sílica para que ocorra a ligação ideal com os aluminatos já presentes no metacaulim.

Portanto, este trabalho desenvolveu uma argamassa geopolimérica contendo vermiculita, nanotitânia e cinza da casca do arroz. A nanotitânia e a cinza da casca do arroz serão utilizadas com uma porcentagem constante pré-estabelecida, enquanto a vermiculita terá variação.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Produzir e avaliar a influência do uso de agregados leves em uma argamassa de matriz geopolimérica com nano-TiO₂ e cinza da casca de arroz até os 28 dias de cura.

Objetivos Específicos

Para tal, objetivos específicos foram estabelecidos:

- Produzir uma argamassa geopolimérica com adição de vermiculita e nanotitânia.
- Estudar as propriedades no estado fresco e endurecido da argamassa geopolimérica até os 28 dias de cura;
- Avaliar o efeito da adição de vermiculita nas propriedades físicas (absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente);
- Avaliar a influência das adições em relação as propriedades mecânicas (compressão e flexão) até os 28 dias de cura;
- Determinar o teor otimizado das adições com base nas propriedades avaliadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ARGAMASSA MULTIFUNCIONAL

O uso da argamassa como material em construções é realizado desde muito tempo atrás com registros datados da pré-história, tendo como principais materiais a cal e a areia (COUTINHO; PRETTI; TRISTÃO, 2013). No Brasil os registros mais antigos datam da utilização da argamassa pelos indígenas que após a vinda dos portugueses, aprenderam novas técnicas construtivas, e passaram da utilização de apenas palha e madeira, para a implementação da mistura de solo com esterco animal, areia, cal e óleo de baleia.

Ao longo do tempo foram estudados novos tipos de ligantes até a criação do cimento Portland, que ganhou este nome no século XIX por assemelhar-se com as rochas da ilha britânica de Portland. Após sua criação inúmeras pesquisas testando diversos tipos de agregados foram e são realizadas até hoje, surgindo assim a argamassa multifuncional que tem o objetivo de melhorar ou modificar as propriedades em relação a uma argamassa comum. A argamassa multifuncional pode ser usada para beneficiar uma propriedade específica em determinada aplicação, esta pode ser uma redução de peso específico, melhor resistência a compressão ou a tração, maior resistência termoacústica, entre outros.

2.1.1 Definições e Aplicações

A argamassa inorgânica tem por definição, ser uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento (NBR 7200,1998).

A argamassa estudada tem como composição o geopolímero (metacaulim e cinza de casca do arroz), areia, o agregado leve (vermiculita), e a nanotitânia.

2.1.2 Propriedades no Estado Fresco

Quando tratamos da aplicabilidade da argamassa, a avaliação de suas propriedades no estado fresco é de suma importância. A plasticidade e fluidez da argamassa devem ser controladas de forma que esta atenda ao meio em que ela será empregada. Uma argamassa de revestimento em alvenaria por exemplo necessita de maior plasticidade do que uma que for empregada para correção de nível do pavimento (contra piso).

Segundo Silva (2015), as propriedades como retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado, também são essenciais para garantir a trabalhabilidade da argamassa.

A trabalhabilidade é o fator de maior interesse nas argamassas, mas ao mesmo tempo é uma propriedade de grande variação, já que esta muda para cada uma das diferentes aplicações em que a argamassa é utilizada. O ajuste da trabalhabilidade acontece primeiramente pela relação de água utilizada na mistura, mas não exclusivamente à água. O traço relativo aos agregados presentes na formulação tem grande influência na trabalhabilidade, pois, quanto maior a relação menor a coesão da formulação devido a falta de aglomerante.

As argamassas geopoliméricas possuem diferentes características de trabalhabilidade em relação as argamassas de cimento Portland comumente utilizadas, já que as mesmas tendem a ter uma maior coesão mesmo com uma relação sólido/líquido menor que as argamassas de cimento Portland.

2.1.3 Propriedades no Estado Endurecido

2.1.3.1 Propriedades Mecânicas

A análise da capacidade de a argamassa resistir a esforços mecânicos como flexão e compressão, são de grande importância, visto que estas são as propriedades mais buscadas em estudos de argamassas como um todo. Conseguir bons resultados em tais propriedades indicam um certo êxito no rumo das formulações que estão sendo produzidas. Ainda são poucos os estudos sobre argamassas geopoliméricas, assim, a busca por resultados teve como base a normatização utilizada para argamassas de cimento Portland.

Tabela 1 – Classificação dos tipos de argamassas. (NBR 13 281, 2005)

Requisitos	Limites	Tipo de argamassa
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa) (NBR 13 279 /95)	$\geq 0,1$ e < 4	I
	≥ 4 e ≤ 8	II
	> 8	III
Capacidade de retenção de água (%) (NBR 13 277 /95)	≥ 80 e ≤ 90	Normal
	> 90	Alta
Teor de ar incorporado (%) (NBR 13 278 /95)	< 8	a
	≥ 8 e ≤ 18	b
	> 18	c

Fonte: NBR 13 281 (2005).

2.2 GEOPOLÍMEROS

Os geopolímeros surgiram como uma alternativa aos materiais compostos de cimento Portland, e tiveram como motivação a busca por materiais mais resistentes, com pouco gasto energético e baixa emissão de gases tóxicos na atmosfera. Outro fator que influenciou a criação dos geopolímeros, foi uma busca por maior resistência térmica após a ocorrência de incêndios que ocorreram na Europa em construções que utilizavam materiais plásticos na sua concepção.

Em 1978, o novo material foi formulado e composto por uma fonte de SiO_2 e Al_2O_3 amorfos e uma solução alcalina ativadora em formulações pré-determinadas. Foi então denominado “geopolímero” conforme acima citado, “geo” para simbolizar a semelhança com materiais geológicos e “polímero” baseado na química dos silicoaluminatos, sendo que, através destes, surgiram os polissilatos, abreviatura de silício-oxo-aluminato (Si-O-Al) (BUCHWALD; DOMBROWSKI; WEIL, 2005).

Os estudos na área de materiais geopoliméricos também tem como motivação a busca por materiais mais resistentes. Pesquisas na área de geopolímero estão sendo fundamentadas e tem grandes possibilidades de serem implantadas a nível mundial (SANTA, 2012). O início da produção dos geopolímeros em larga escala trariam uma redução na produção de cimento ao longo dos anos, o que iria beneficiar na redução de emissão de poluentes no mundo inteiro.

Os materiais álcali ativados como o geopolímero tem a vantagem de poder usar resíduos industriais que contenham aluminossilicatos amorfos, para melhorar as

propriedades de sua matriz, trazendo assim mais qualidade para a matéria prima utilizada, podendo se controlar a razão entre silicatos e aluminatos.

A gama de aplicação dos geopolímeros é próxima a das matrizes cimentícias que utilizam o cimento Portland, podendo ser usadas como cerâmicas de revestimento, argamassas ou até concretos geopoliméricos.

Em novembro de 2014 foi inaugurado o aeroporto Brisbane West Wellcamp em Toowoomba na Austrália (Figura 1), e se tornou a construção com maior uso de geopolímero no mundo, ao todo foram aproximadamente 100 000 toneladas de concreto geopolimérico, a iniciativa em usar o geopolímero foi com objetivo de construir o aeroporto mais “verde” do mundo, ou seja, o aeroporto mais ecológico do mundo.

Figura 1: Aeroporto Brisbane West Wellcamp, Austrália.

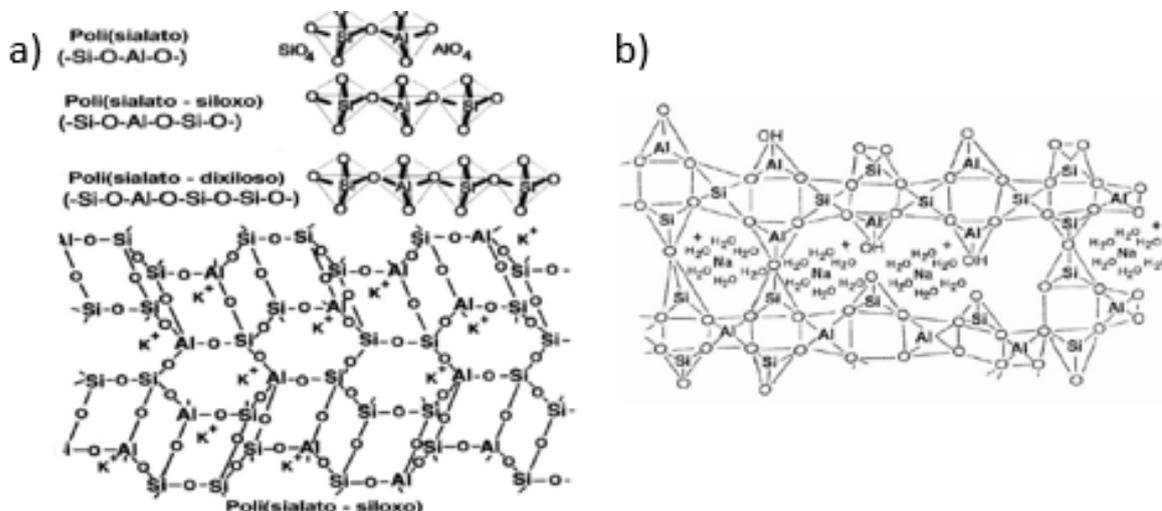


Fonte: The Chronicle, (2014).

Desde 1983 nos EUA, Davidovits (2008) esteve envolvido na criação do novo conceito de cimento envolvendo a química geopolimérica. Estes estudos levaram a criação de uma matriz cimentícia inorgânica álcali ativa, e resultou o desenvolvimento de polímeros de alumino-silicatos inorgânicos, ou Geopolímeros. A reação química dos geopolímeros é rápida e a cura inicial requer de 24 a 48 horas.

Os geopolímeros são constituídos por aluminatos e silicatos que se alternam em uma malha tridimensional em coordenação tetraédrica, compartilhando todos os oxigênios, assim surge a nomenclatura polissialato como é mostrado na Figura 2 (RAMOS, 2010).

Figura 2: a) Coordenação tetraédrica de geopolímero com compartilhamento de todos os oxigênios com a presença do cátion K^+ ; b) Estrutura proposta para o polímero Na-polissialato.



Fonte: Teixeira *et al.* (2004), apud Ramos (2010, p. 5).

Por ter um rápido tempo de cura inicial em relação ao cimento, isto dá uma certa vantagem ao geopolímero quando se necessita uma aplicação onde a utilização da mesma acontece em pouco tempo, por exemplo calçadas, parques, rampas de acessibilidade, reparos emergenciais, entre outros. Seu custo de produção apesar de ser mais elevado que ao cimento Portland não deve ser comparado, pois, ainda não é aplicado em larga escala, o que diminuiria consideravelmente seu custo de produção.

2.2.1 Metacaulim

O metacaulim é uma das matérias primas utilizadas na produção de matrizes geopoliméricas. É uma argila conhecida por caulim, e tem em sua formação alterações de rochas variadas, amorfas e cristalinas. O principal argilomineral que compõe o caulim, é a caulinita.

Metacaulim precede do termo “meta”, que significa mudança e “caulim”, originado do termo chinês “Kauling”, ou “colina alta” que se refere a uma colina de Jauchau Fu, onde o material obtido é formado pela caulinita, apresentando cor branca ou quase branca devido ao baixo teor de ferro (SILVA, 1993).

Como trata-se de uma matéria prima extraída de rochas, o metacaulim pode ter sua coloração variável, podendo ser próxima ao branco ou um tom mais rosado. Como é uma matéria prima com porcentagens consideradas de aluminossilicatos amorfos, é bastante usado em diversos estudos que envolvem a ativação alcalina.

O caulim é um minério e sua microestrutura é composta por silicatos hidratados de alumínio, tendo como um dos principais constituintes a caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), mas também pode ser formado pela haloisita ($\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4\text{Al}_2\text{nH}_2\text{O}$). Sua composição é geralmente expressa em óxidos, o que não descarta a possibilidade de alguns elementos encontrarem-se em formas mais complexas e muitas vezes não catalogadas (SANTA, 2012).

Para que o material se torne mais atrativo no uso de matrizes geopoliméricas, o mesmo passa por tratamentos térmicos com temperaturas pré-definidas para que se aumente o poder reativo e o torne mais apropriado para sofrer ação alcalina.

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

O metacaulim utilizado neste presente trabalho teve a cinza da casca do arroz como suplemento de aluminossilicatos amorfos, que também sofrerão ativação alcalina.

2.2.2 Ativador Alcalino - Hidróxido de Sódio

Os geopolímeros são formados por materiais cimentícios suplementares e os líquidos alcalinos, que podem ser a base de sódio ou potássio, sendo os mais utilizados o hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) (MACCARINI, 2015). A ativação alcalina é uma reação de hidratação de aluminossilicatos com substâncias do tipo alcalino ou alcalino-terroso. As soluções podem ser simples ou compostas, com silicato de sódio ou de potássio.

Ao entrar em contato com uma solução alcalina as espécies de aluminossilicatos dissolvem-se, pois ocorre a lixiviação de Al_3^+ e Si_4^+ , para que haja êxito nesse processo a concentração do ativador deve

ser controlada. Havendo êxito, ocorrerá a quebra das ligações originais da matéria-prima (SANTA, 2012).

Um dos principais fatores a ser analisado em relação a solução ativadora é a sua concentração, já que, o excesso de solução ativadora pode fazer com que ocorra o processo de florescência na matriz geopolimérica. Segundo estudos já realizados por outros autores, a molaridade ideal das soluções estaria entre 8 e 10 mols, mas, existe uma grande variação neste parâmetro pois a quantidade de solução varia conforme a razão sólido/líquido. Aparentemente a forma mais correta de estipular a quantidade de agente ativador é através de uma relação de sódio/potássio com a porcentagem de aluminossilicatos presente na formulação utilizada.

2.3 CINZA DA CASCA DE ARROZ

A casca do arroz é subproduto do processo de beneficiamento do arroz, bem como grãos de arroz quebrados e o farelo. Tais subprodutos são pouco utilizados na indústria alimentar e não-alimentar.

O “resíduo” casca de arroz, dependendo do modo de cultivo, pode chegar a 35% do total do produto colhido. Parte dessa porcentagem é utilizada como combustível para combustão na geração de energia, o que sobra é a cinza da casca do arroz. O avanço em pesquisas que tornem esse resíduo utilizável na indústria, acarretaria no aumento do valor agregado do mesmo, e na diminuição de um grave problema ambiental (SILVA, 2009).

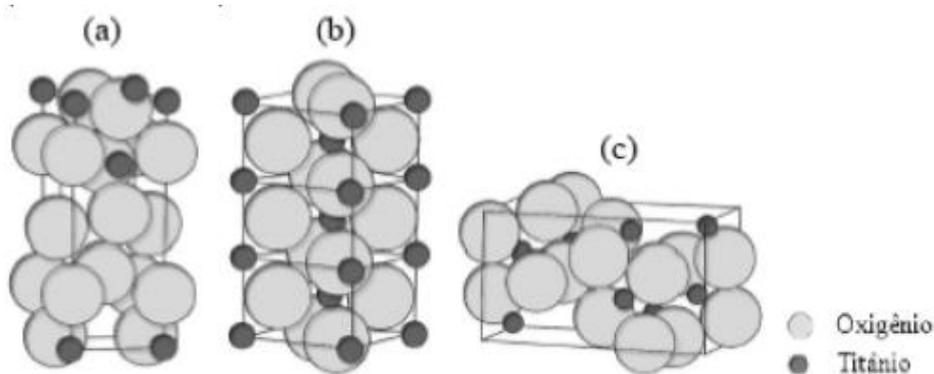
A cinza da casca do arroz é um material rico em sílica, isso a torna muito interessante na aplicação de matrizes geopoliméricas como material incorporador de silicatos amorfos. A **CCA** quando produzida em condições controladas é chamada de sílica de casca do arroz, sendo um material de alta qualidade podendo conter em sua composição mais de 90% de sílica (MARANGON *et al*, 2013)

Apesar de já ser empregada em matrizes de cimento Portland, a CCA tem maior eficiência quando misturada em matrizes geopoliméricas, pois, em cimentos comuns não se tem a ativação por meio alcalino. A CCA é utilizada para que se faça a correção da razão molar entre sílica e alumina, assim, pode se chegar na razão molar mais indicada para uma matriz geopolimérica.

2.4 NANOTITÂNIA ($n\text{TiO}_2$)

O titânio foi descoberto em 1791 na Inglaterra, por Willian Justin Gregor, é o nono elemento mais abundante na terra. Através do titânio tem-se a obtenção do dióxido de titânia (TiO_2), que é um semiconductor sensível a luz, o qual absorve radiação eletromagnética de regiões UV (SILVA, 2015). O TiO_2 é encontrado sob três estruturas cristalinas: anatásio, rutilo e brookite (Figura 3). Estas formas de TiO_2 podem ser naturais ou preparadas sinteticamente. Mas somente as fases anatásio e rutilo são produzidas comercialmente (CASAGRANDE, 2012).

Figura 3: Estrutura das fases de TiO_2 : (a) anatásio; (b) rutilo; (c) brookite.



Fonte: Casagrande (2012, p. 22).

A principal utilização da nanotitânia em argamassas, é apresentar reações fotocatalíticas. A fotocatalise é o efeito da nanotitânia que através da incidência da luz sobre ela faz com que a mesma purifique o ar ao seu redor. Além disso, anatásio é também utilizado no processo de degradação fotocatalítica, pois é quimicamente estável, inofensivo e, em comparação com outros óxidos metálicos semicondutores, é relativamente barato (HUSKEN; FOME; BROUWERS, 2009).

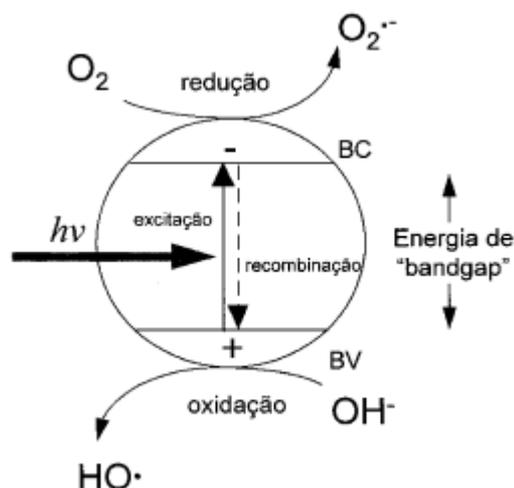
2.4.1 Fotocatálise Heterogênea com TiO_2

A incorporação de um material que apresente funções fotocatalíticas na argamassa, acontece principalmente pela busca de materiais mais sustentáveis, visto que sua presença na formulação não traz benefícios como aumento de resistência.

Processos oxidativos avançados (POA) são processos de descontaminação de ambientes que atraem interesse por serem sustentáveis. Esses processos são baseados na formação de agentes altamente oxidantes, como radicais hidroxilas (OH) que promovem mineralização total para CO_2 e água quando reagidos com diversas classes de compostos. POA podem ser divididos em homogêneos e heterogêneos, de acordo com a geração de hidroxilas com ou sem irradiação ultravioleta. Para o sistema heterogêneo, podem-se citar os semicondutores como dióxido de titânio, denominada fotocatalise heterogênea (RAQUEL, NOGUEIRA e JARDIM, 1998, apud SILVA, 2015).

O princípio da fotocatalise heterogênea envolve a ativação de um semicondutor por luz solar ou artificial, caracterizado por bandas de valência e bandas de condutores (RAQUEL; NOGUEIRA; JARDIM, 1998). A Figura 4 apresenta o esquema da partícula do semicondutor.

Figura 4: Esquema representativo da partícula de um semicondutor. BV: banda de valência; BC: banda de condução.



Fonte: Raquel, Nogueira e Jardim (1998, p. 70).

A região entre as bandas de valência e condução é chamada de “bandgap”.

2.5 AGREGADO LEVE - VERMICULITA

Os agregados leves são usados em diferentes ramos da indústria como no agronegócio, na construção civil entre outros. A vermiculita expandida é um agregado leve que se forma derivado da vermiculita que é formada naturalmente do mineral do

grupo das micas. Em sua composição destacam-se a presença de silicato de alumínio, magnésio e ferro. A vermiculita expandida é obtida após sua forma original ser submetida a temperaturas próximas de 800°C, esta sofre então uma expansão de até quinze vezes o seu volume original.

Entre suas características estão seu bom isolamento termo acústico para lajes e paredes, proteção do impermeabilizante em lajes de cobertura e rebocos isolantes. (SILVA, 2015). O principal objetivo da utilização deste agregado, é o aumento da resistência termo acústica, mas, outro aspecto avaliado é a redução do peso específico da argamassa, dado a incorporação da mesma. O fabricante ainda cita outros aspectos, entre eles o alívio de cargas nas estruturas, boa resistência mecânica, estabilidade física, material inerte, entre outros.

A aplicação da vermiculita depende da sua granulometria e pureza, as granulometrias comerciais comumente encontradas são super-fina, fina e média.

Vermiculitas com granulometria mais fina são comumente utilizadas na construção civil, além de serem usadas na produção de fertilizantes e de alimentação para animais. Já as vermiculitas com granulometria mais grossa são utilizadas na horticultura, cultivo e germinação de sementes, dentre outros (SILVA, 2015).

A vermiculita tem na argamassa de revestimento de alvenaria sua principal utilização na construção civil, devido a sua propriedade de ser um bom isolante termoacústico, mas pode ser empregada também em contrapiso de lajes já que também tem um baixo peso específico.

3 METODOLOGIA

Para que os objetivos estipulados neste trabalho sejam alcançados foram moldados corpos de prova em argamassa geopolimérica multifuncional. Estas tiveram diferentes formulações, com concentração fixa de nanotitânia, mas variando a dosagem de agregado leve avaliado no trabalho.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

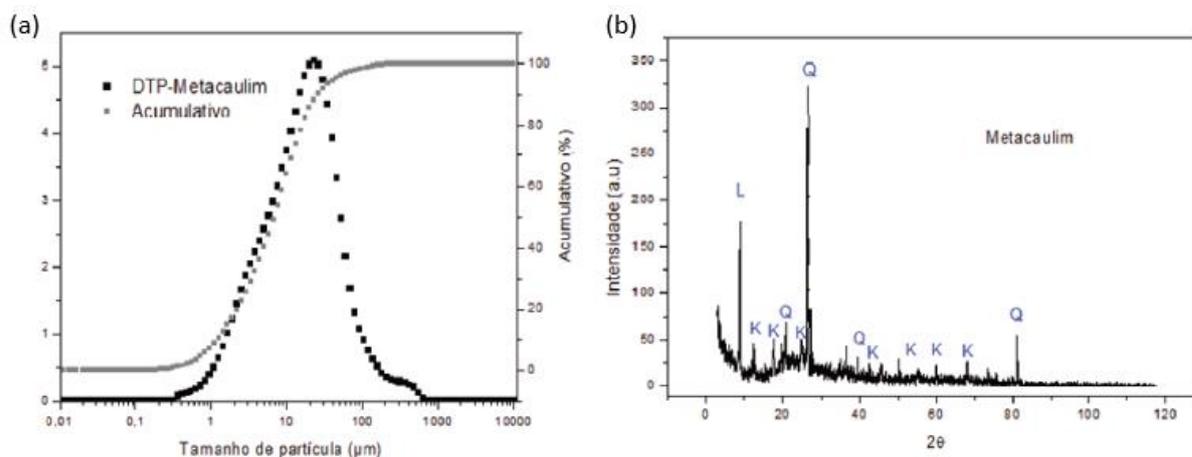
3.1.1 Argamassa Geopolimérica

A argamassa utilizada neste trabalho foi desenvolvida pelo autor, e teve em todas as formulações a presença do metacaulim, solução ativadora (hidróxido de sódio), dióxido de titânia e areia. Foram produzidas 1 formulação de referência, ou seja, sem a incorporação da vermiculita, mas já com a cinza de casca do arroz (CCA), e outras 4 formulações com teores distintos de vermiculita.

3.1.1.1 Metacaulim

O metacaulim foi fornecido pela empresa *Metacaulim do Brasil*, e utilizado como fonte de alumina e sílica. A densidade real do metacaulim de 3,17 g/cm³, foi determinada utilizando um picnômetro Ultracycnometer 1200 P/N. A composição química do metacaulim obtida estão apresentadas na Tabela 2, informações que foram determinadas por fluorescência de raios-X. As diferentes fases identificadas no metacaulim foram: caulinita (K), o quartzo (Q) e a mica (L) que são formadas pelo Si e Al, mas apresentam estruturas diferentes conforme figura 5(a). Segundo Maccarini (2015), o tamanho médio das partículas foi de 21µm e D₅₀ = 6,5 µm como pode ser visualizado na figura 5(b).

Figura 5: (a) Difração de Raio-X do Metacaulim; (b) Distribuição granulométrica do Metacaulim.



Fonte: Núcleo de Pesquisa CERMAT (2015).

Tabela 2 – Composição química do Metacaulim determinada por FRX

Óxidos	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
Metacaulim (%)	32,6	0,1	2,3	2,1	0,6	<0,05	<0,05	0,1	57,1	1,5

Fonte: Núcleo de Pesquisa CERMAT, 2015.

Figura 6: Matéria prima Metacaulim



Fonte: Autor (2016).

3.1.1.2 Cinza da Casca do Arroz (CCA)

A cinza da casca do arroz foi proveniente da empresa Pilecco Nobre Alimentos, sua composição química é apresentada na Tabela 3. Além da composição química, temos também a área específica da cinza.

Tabela 3 - Composição química da sílica de casca de arroz

Sílica da Casca do Arroz	
Perda ao Fogo	3,50%
Dióxido de Silício – SiO ₂	91,48%
Óxido de Cálcio - CaO	0,36%
Óxido de Magnésio - MgO	0,32%
Óxido de Ferro - Fe ₂ O ₃	0,05%
Óxido de Alumínio - Al ₂ O ₃	0,00%
Óxido de Sódio - Na ₂ O	0,04%
Óxido de Potássio - K ₂ O	1,40%
Óxido de Manganês - MnO	0,32%
Anidrido Sulfúrico – SO ₃	0,15%
Pentóxido de Difósforo - P ₂ O ₅	0,45%
Área Específica 21142m ² /kg	

Fonte: Marangon *et al* (2013, pag. 4), adaptado pelo Autor.

Figura 7: Cinza de casca do arroz (CCA).



Fonte: Autor (2016).

3.1.1.3 Solução Ativadora

A solução ativadora é composta pelo hidróxido de sódio da empresa Unipar Carbocloro, material em forma de escamas com uma pureza entre 97% a 100%. Foi misturada com água para atingir a molaridade desejada de 10 mols.

Figura 8: a) Hidróxido de sódio (NaOH), b) Solução ativadora pronta.

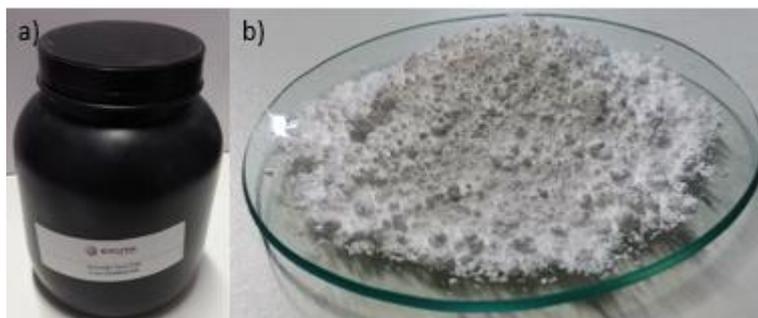


Fonte: Autor (2016).

3.1.1.4 Nanotitânia (nTiO₂)

A nanotitânia utilizada (Figura 9) é da empresa Evonik, também identificada como Aeroxide TiO₂ P25, e tem alto grau de pureza conforme indicado na tabela 3

Figura 9: a) Aeroxide TiO₂ P25, embalagem com 250g; b) Nanotitânia.



Fonte: Autor (2016).

Tabela 4 – Propriedades físicas da nanotitânia

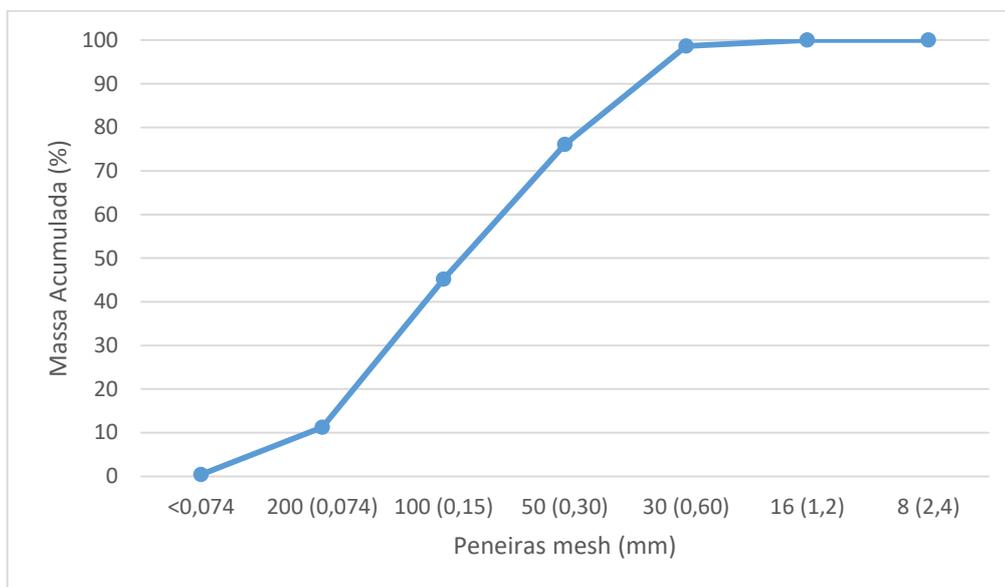
Área superficial específica	35 – 65 m ² .g ⁻¹
Densidade	100 – 180 g/l
Dióxido de titânio	≥99,50%
Al ₂ O ₃	≤0,3%
SiO ₂	≤0,2%
Fe ₂ O ₃	≤0,1%
Resíduo retido peneira 45µm	≤0,05%

Fonte: SILVA (2015, p. 37).

3.1.1.5 Areia

A areia utilizada em todas formulações foi fornecida pela empresa Supremo, e tem a granulometria apresentada no gráfico abaixo. Foi optado por utilizar uma areia comercial e não experimental, afim de tornar a argamassa mais próxima da utilizada em uma aplicação comum.

Figura 10: Distribuição Granulométrica da Areia



Fonte: Autor (2016).

Figura 11: Areia usada para a produção das argamassas geopoliméricas.

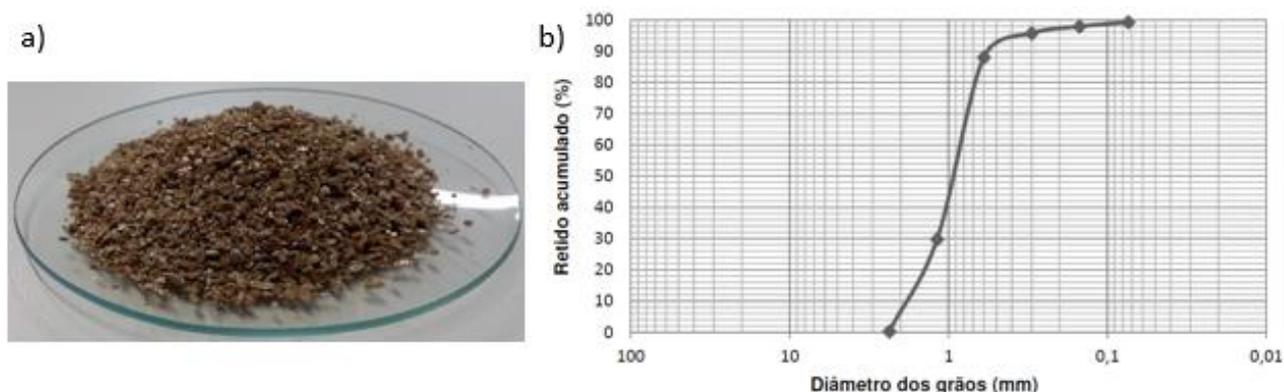


Fonte: Autor (2016).

3.1.1.6 Vermiculita

A vermiculita expandida usada como substituto parcial da areia na composição da argamassa geopolimérica, é comercializada pela empresa Terra Mater Saving Energy (Figura. 12).

Figura 12: a) vermiculita expandida fina utilizada para a produção das argamassas geopoliméricas; b) curva granulométrica da vermiculita.



Fonte: Figura 12(a) autor (2016); Figura 12(b) Silva (2015, p. 39).

A tabela 5 apresenta algumas propriedades da vermiculita expandida utilizada no presente trabalho.

Tabela 5: Características técnicas da Vermiculita Expandida

Granulometria	Super fina
Massa específica aparente	80-150 kg/m ³
Condutividade térmica	0,070 W/m.K
Temperatura de amolecimento	1260°C inicial / 1350°C final
Umidade máxima	7,0%

Fonte: SILVA (2015, p.39).

3.2 PREPARO DAS ARGAMASSAS

Foram produzidas 5 formulações em argamassas geopolimérica. Todas formulações seguiram um padrão de tempo total de 10 minutos: (i) 1 minuto para

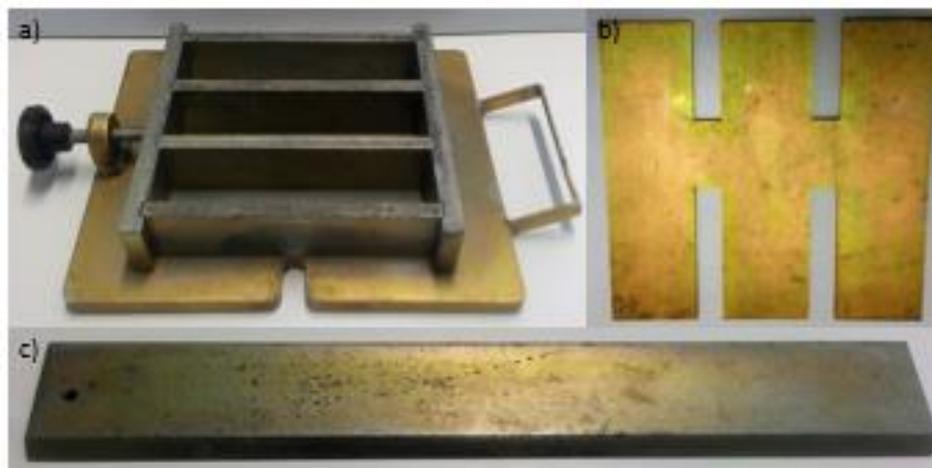
misturar o metacaulim a nanotitânia e a CCA ao mesmo tempo que se adiciona a solução ativadora na velocidade de 76 rpm do misturador mecânico; (ii) a mistura permaneceu por 5 minutos e 30 segundos misturando para ficar homogênea; (iii) colocação dos agregados leves já previamente hidratados que são misturados por 1 minuto na velocidade de 112 rpm; (iv) o misturador mecânico foi desligado por 1 minuto e 30 segundos e com o auxílio de uma espátula raspou-se as laterais e fundo da cuba; (v) novamente o aparelho foi ligado na velocidade de 76 rpm para deixar a mistura homogênea.

3.2.1 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova de dimensões 4x4x16cm foram moldados seguindo a NBR 13279:2005. Após o preparo da argamassa, com o molde já fixado à mesa de adensamento, introduziu-se em cada espaço do molde uma porção de argamassa equivalente à metade do volume reservado foi utilizado o lado maior do nivelador de camadas para formar uma camada uniforme. Em seguida aplicou-se 30 quedas através da mesa de adensamento, então foi completado o volume restante dos espaços dos moldes, utilizando o lado menor do nivelador de camadas, aplicou-se novamente as 30 quedas através da mesa de adensamento, e por fim os moldes foram nivelados na parte superior com uma régua metálica.

Os corpos de prova permaneceram no molde em estufa a 40°C por 24h, foram então desmoldados, e voltaram para estufa.

Figura 13: a) molde para confecção dos corpos de prova; b) nivelador de camadas; c) régua metálica.



Fonte: Autor (2016).

Figura 14: a) Contador de Golpes Automático; b) Mesa de adensamento por queda para argamassas



Fonte: Autor (2016).

3.2.2 Flow Table Test (FTT)

O ensaio de espalhamento FTT foi feito de acordo com a NBR 13276 – 2002, que consiste primeiramente na limpeza prévia com esponja ou pano umedecido do tampo da mesa e molde tronco cônico, para que as superfícies fiquem ligeiramente úmidas. Após a preparação da argamassa, colocou-se o molde no centro da mesa de índice de consistência que foi preenchido em três camadas iguais de material, aplicando respectivamente 15,10 e 5 golpes com o soquete, com o objetivo de

preenche-las uniformemente. Após o preenchimento o molde foi rasado e então retirado ficando apenas a argamassa para que fossem feitos os 30 golpes em 30 segundos. Por fim, registrou-se 3 medidas de diâmetro do espalhamento da argamassa e tirou-se a média dessas.

Figura 15: a) mesa para realização do FTT; b) molde tronco cônico; c) soquete; d) espátula para preenchimento do molde; e) espátula para rasar molde.



Fonte: Autor (2016).

3.3 ENSAIO NO ESTADO ENDURECIDO

3.3.1 Propriedades Físicas

As propriedades físicas foram determinadas através do ensaio de Arquimedes onde se mede massa seca, saturada e imersa para encontrar a densidade aparente, porcentagem de porosidade aberta e porcentagem de absorção de água, para os corpos de prova rompidos com idade de 7 e 28 dias. Para tais pesagens foi usado balança de precisão de $\pm 0,01\text{g}$. Tais propriedades foram obtidas pelas equações 1, 2 e 3.

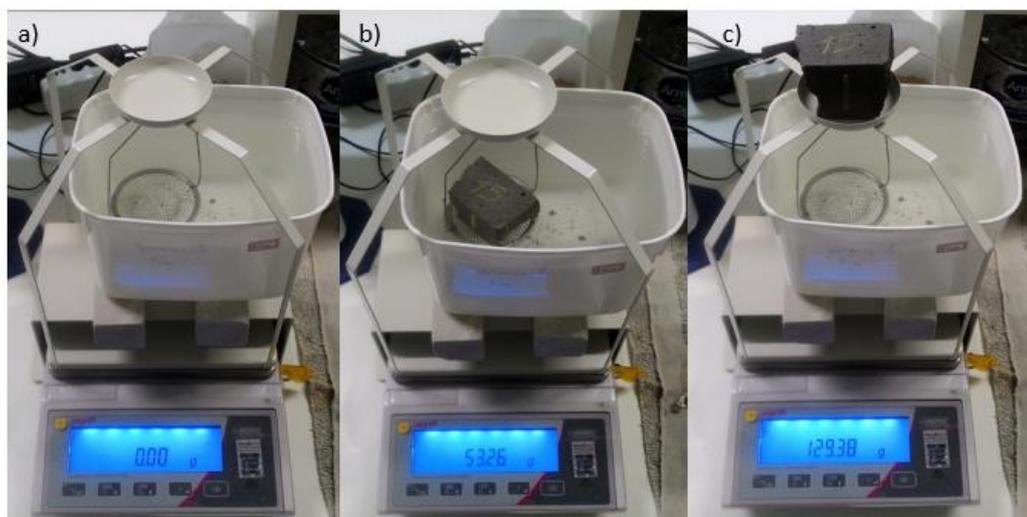
Onde:

$$m_s = \text{massa seca} \quad (\text{Eq. 1}) \quad \rho_{ap} = \frac{m_s}{m_{SSS} - m_i}$$

$$m_i = \text{massa imersa} \quad (\text{Eq. 2}) \quad A_{H2O} = \frac{m_{SSS} - m_s}{m_s} * 100$$

$$m_{SSS} = \text{massa com superfície saturada seca} \quad (\text{Eq. 3}) \quad P_{ab} = \frac{m_{SSS} - m_s}{m_{SSS} - m_i} * 100$$

Figura 16: a) aparato para ensaio de Arquimedes; b) pesagem submersa; c) pesagem de superfície saturada.



Fonte: Autor (2016).

A pesagem da massa seca dos corpos de prova foi feita sem a utilização dos aparatos, e ocorreu após os corpos de prova ficarem aproximadamente 24h em estufa a 100°C.

3.3.2 Propriedades Mecânicas

Foram obtidas as propriedades mecânicas de compressão e flexão por meio de uma máquina de carga universal semelhante à da figura 17(a), disponibilizada pelo Centro Universitário – Católica de Santa Catarina (unidade Joinville). Para o ensaio de compressão foi utilizado um dispositivo semelhante ao da figura 17(b), que realizou

o rompimento de corpos de prova com dimensões de 4x4x4 cm, e para o ensaio de flexão um dispositivo semelhante ao da figura 17(c), que realizou o rompimento de corpos de prova com dimensões de 4x4x16 cm.

Figura 17: (a) máquina de carga universal; (b) dispositivo para ensaio de compressão; (c) dispositivo para ensaio de flexão.



Fonte: Figura (a): (www.solucoesindustriais.com.br); Figuras (b) e (c): (www.matest.com).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios realizados nas argamassas geopoliméricas em estado fresco e endurecido. Teremos também a análise dos resultados, procurando justificá-los com base na adição dos materiais nas formulações apresentadas. Para trabalhabilidade foi feito apenas 1 ensaio de Flow Table Test para cada formulação. Os resultados de densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água foram obtidos pela média no ensaio de 5 amostras para cada formulação, tanto para 7 quanto 28 dias de cura. Os dados de flexão tiveram 3 amostras de cada formulação apenas para os 28 dias de cura, já os de compressão foram 5 amostras de cada formulação para 7 e 28 dias de cura, para que fosse feita a média.

Tabela 6: Composição das Formulações utilizadas

CP	Metacaulim(g)	CCA(g)	Nanotitânia(g)	Areia(g)	Vermiculita(g)	H2O na Solução(g)	NaOH(g)	H2O para Hidratação da Vermiculita(g)
0%	320	80	20,8	1200	0	285,714	131,146	0
5%	320	80	20,8	1140	60	285,714	131,146	150
7,50%	320	80	20,8	1110	90	285,714	131,146	195
10%	240	60	15,6	810	90	214,286	98,364	180
15%	240	60	15,6	765	135	214,286	98,364	247,5

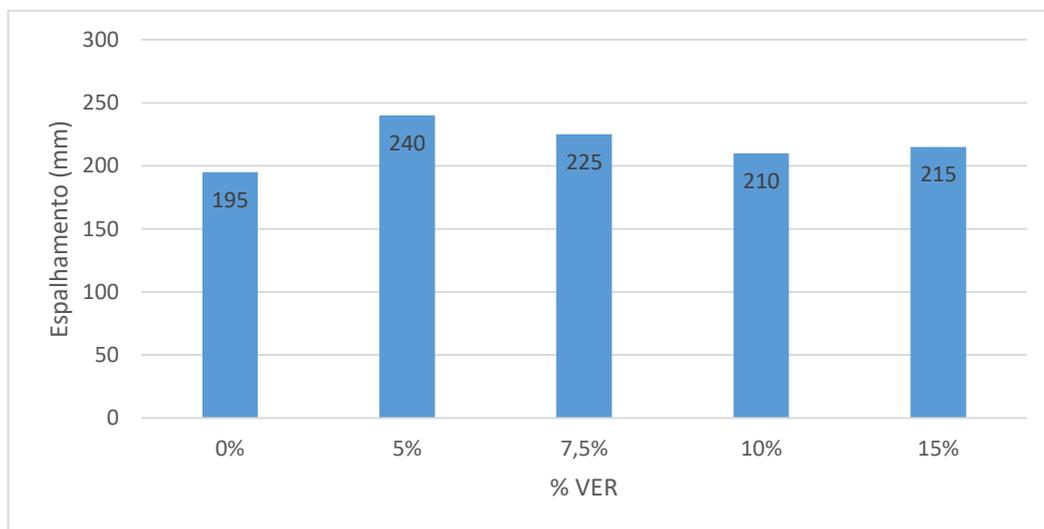
Fonte: Autor (2016).

4.1 TRABALHABILIDADE

Foi pré-estabelecido que as amostras geopoliméricas com relação sólido/líquido de 1,4 com adição de água para as formulações com vermiculita, deveria manter espalhamento de 220 \pm 20 mm, de modo que mantivéssemos uma trabalhabilidade aceitável. Não existe ainda norma para trabalhabilidade de argamassa geopolimérica, então os valores pré-estabelecidos foram determinados

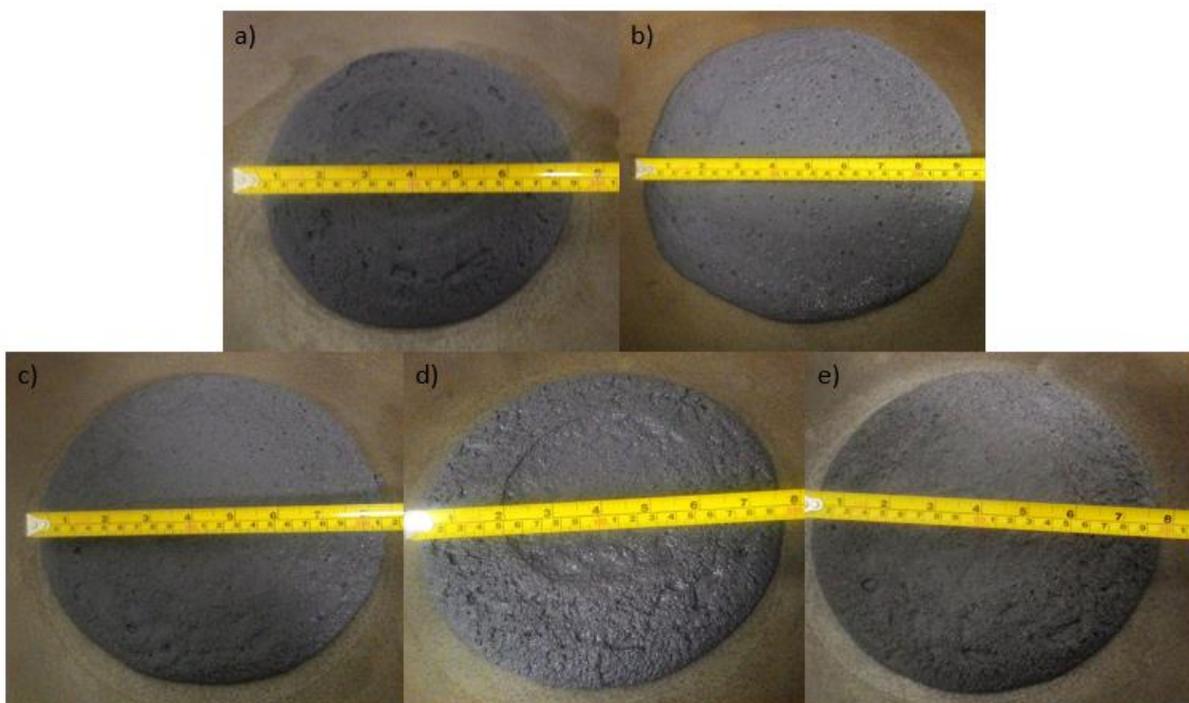
por ensaios previamente feitos, observando visualmente a coesão da argamassa geopolimérica.

Figura 18: Resultados do Flow Table Test.



Fonte: Autor, 2016

Figura 19: a) formulação de referência 0% de VER; b) 5% VER; c) 7,5% VER; d) 10% VER; e) 15% VER.



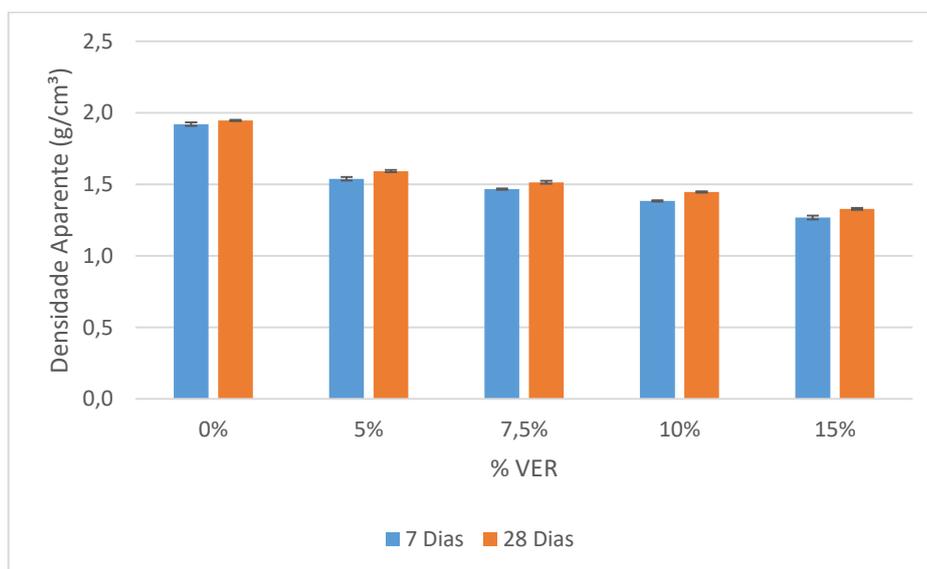
Fonte: Autor, 2016.

Todas as formulações que apresentam a vermiculita em sua composição necessitaram de um acréscimo de água para que a trabalhabilidade desejada fosse alcançada, para a formulação com 5% foi adicionado cerca de 52% a mais de água, e para cada 2,5% a mais de vermiculita que foi incorporado no lugar da areia, foi adicionado aproximadamente mais 10% de água.

4.2 DENSIDADE APARENTE

Foram obtidos os resultados de densidade aparente para as formulações de argamassa geopolimérica aos 7 e 28 dias de cura.

Figura 20: Comparativo de densidade aparente para corpos de prova com 7 e 28 dias de cura.



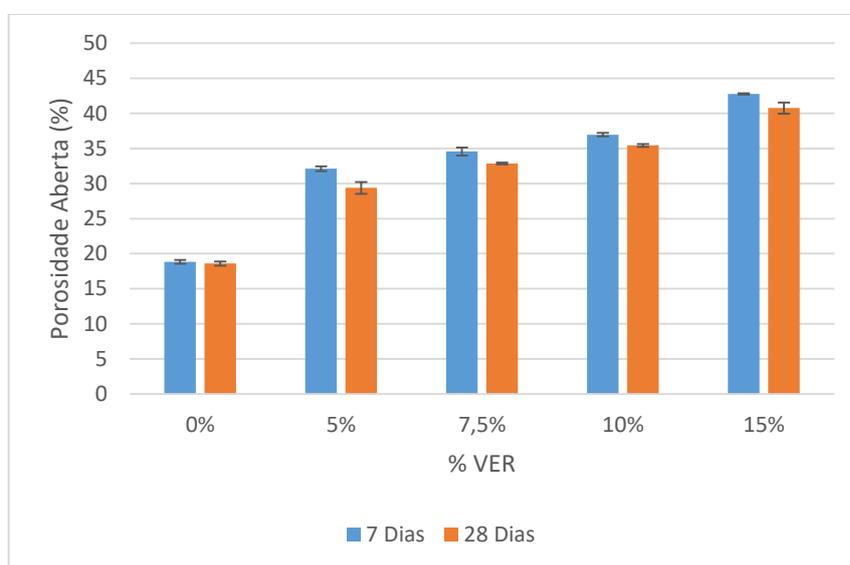
Fonte: Autor, 2016.

Os resultados de densidade aparente mostram que, esta foi influenciada diretamente pelo teor de vermiculita incorporado, e que a incorporação de 15% resultou na redução de aproximadamente 32% da densidade em relação a referência. Foram feitos 5 ensaios para cada formulação e todos apresentaram um desvio padrão relativamente baixo, sendo o maior para a formulação com 5% de vermiculita com 28 dias de cura que foi de 0,013 g/cm³.

4.3 POROSIDADE ABERTA

Foram obtidos os resultados de porosidade aberta para as formulações de argamassa geopolimérica aos 7 e 28 dias de cura, e como esperado a porosidade aberta apresentou um resultado inversamente proporcional ao de densidade aparente, ou seja, os maiores percentuais foram encontrados nas formulações com menor densidade aparente.

Figura 21: Comparativo de porosidade aberta para corpos de prova com 7 e 28 dias de cura.



Fonte: Autor, 2016.

Com o objetivo de encontrar uma matriz geopolimérica de maior resistência termoacústica, os resultados de porosidade aberta são de grande importância, novamente pode-se identificar a grande influência da VER nas formulações. Os resultados de porosidade aberta tiveram um grande aumento das formulações com VER em relação a referência, onde as amostras com 7,5% de VER tiveram um acréscimo de 80% em relação e referência, e as com 15% de VER um acréscimo aproximado de 223%.

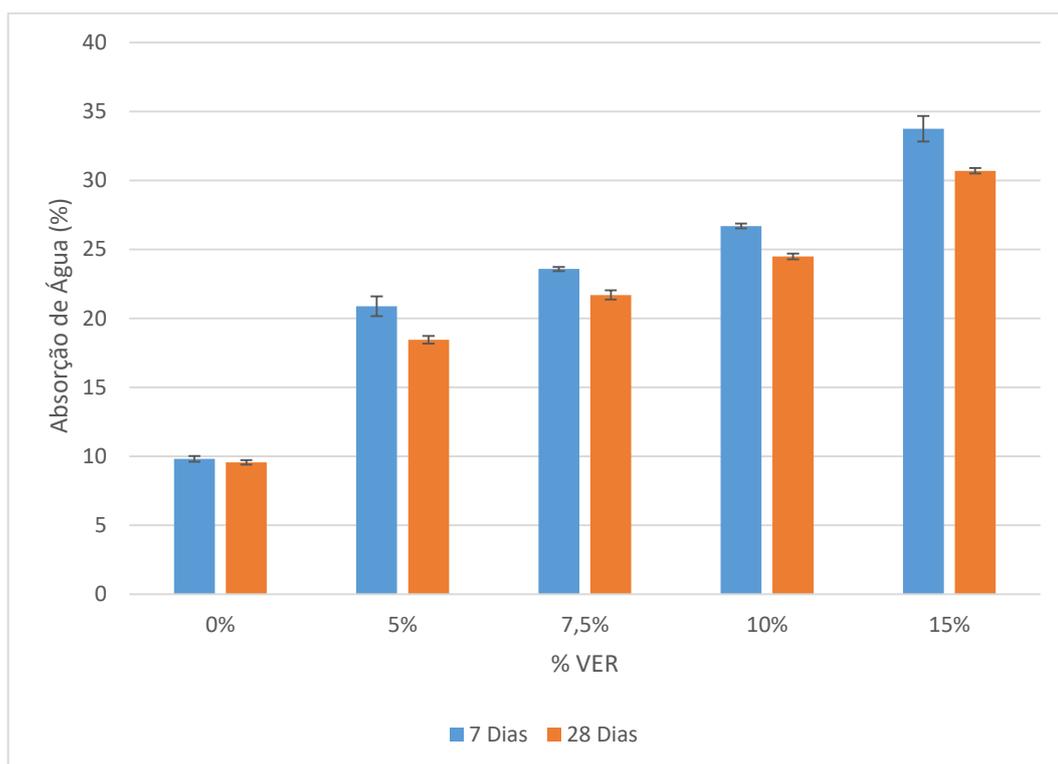
Estes resultados se devem pela característica da VER, que tem uma alta capacidade em absorver água, e durante o processo de cura esta água retida na matriz geopolimérica evapora, tornando a matriz porosa pela maior quantidade de vazios e pela presença da VER que é uma adição porosa e ocupa um espaço na

matriz que antes era ocupado por outra matéria prima com maior densidade (SILVA, 2015).

4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Foram obtidos os resultados de absorção de água para as formulações de argamassa geopolimérica aos 7 e 28 dias de cura. Como esperado a absorção de água apresentou comportamento diretamente proporcional ao de porosidade aberta e inversamente proporcional ao de densidade aparente.

Figura 22: Comparativo de absorção de água para corpos de prova com 7 e 28 dias de cura.



Fonte: Autor, 2016.

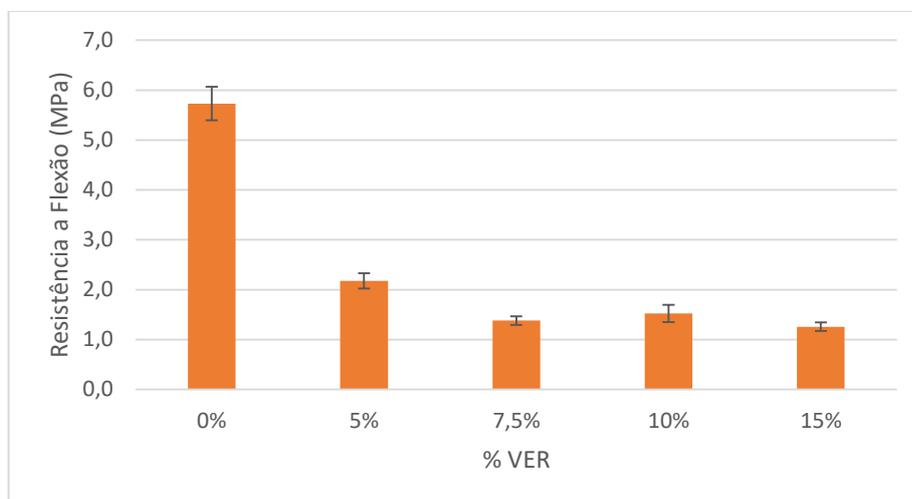
Bem como a porosidade aberta, A formulação com 5% de VER resultou em um aumento aproximado de 100% da absorção de água em relação a amostra de referência, e a formulação com 15% de VER apresentou um aumento aproximado de 333%.

4.5 RESISTÊNCIA A FLEXÃO E COMPRESSÃO

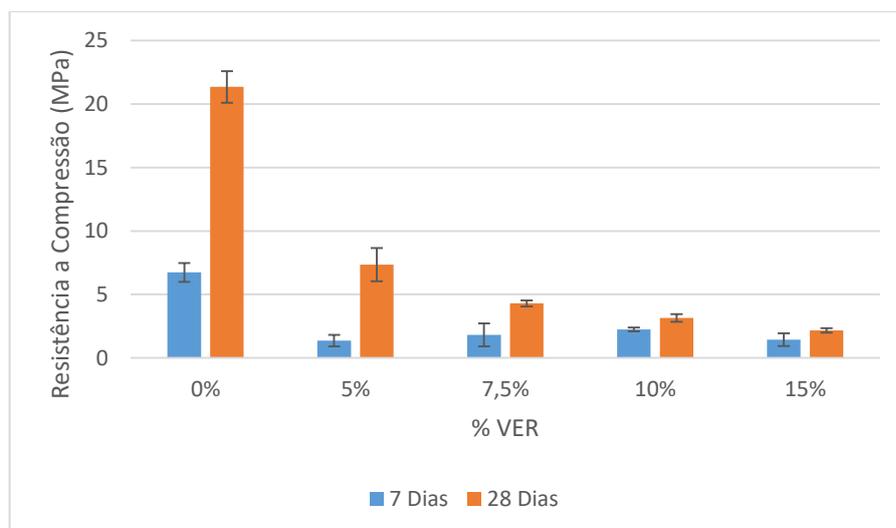
Foram obtidos os resultados de compressão para as formulações de argamassa geopolimérica aos 7 e 28 dias de cura. Como esperado todos os resultados com 7 dias de cura apresentaram menor resistência que os de 28 dias. Foram obtidos também resultados de flexão para os 28 dias de cura.

Figura 23: Resultados das propriedades mecânicas: a) flexão e b) compressão para corpos de prova até 28 dias de cura.

a)



b)

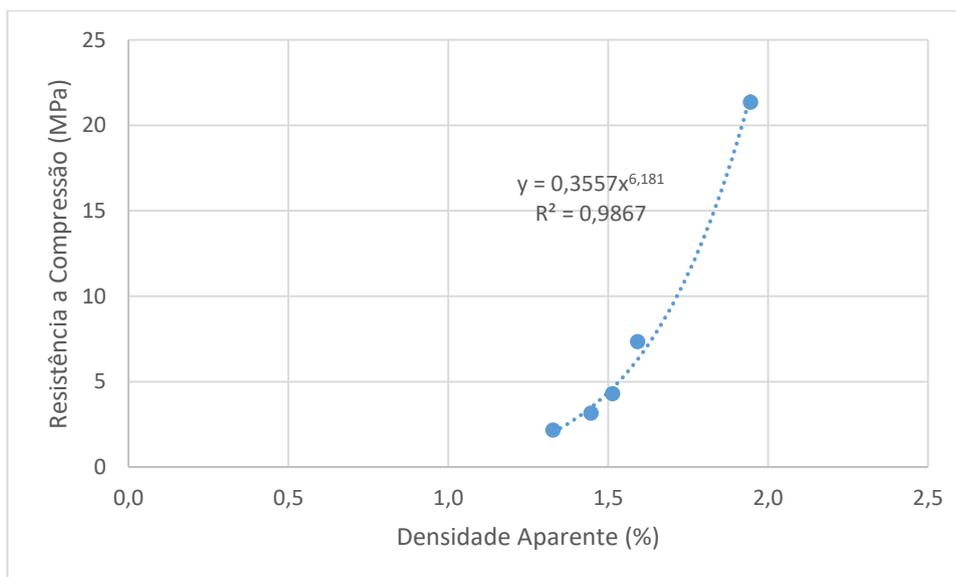


Fonte: Autor (2016).

Os resultados de compressão para os 7 dias de cura mostraram como a água foi fator de grande importância para o ensaio, pois, a amostra com maior espalhamento foi a que apresentou o pior resultado de resistência a compressão em relação a todas as outras formulações, mas esta mesma após os 28 dias de cura apresentou a maior resistência a compressão em relação as formulações que tinham a VER incorporada. É importante destacar também o aumento de resistência para a amostra de referência que foi de 317%, e 540% na formulação de 5% VER.

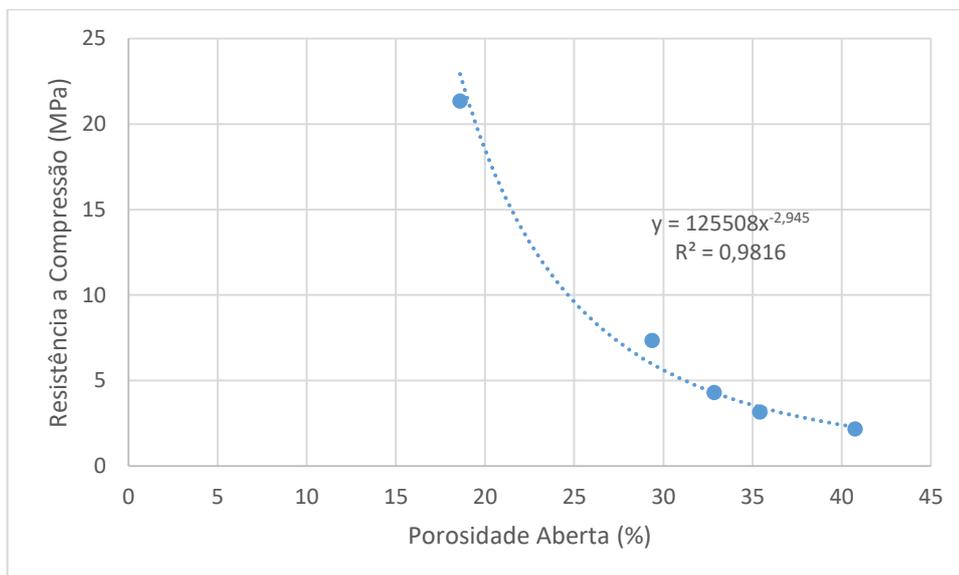
Abaixo as figuras 24, 25 e 26 apresentam relações entre compressão e as propriedades físicas densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água aos 28 dias de cura, todas relações apresentam uma linha de tendência de potência com sua respectiva equação e R^2 .

Figura 24: Relação entre resistência a compressão e densidade aparente aos 28 dias de cura.



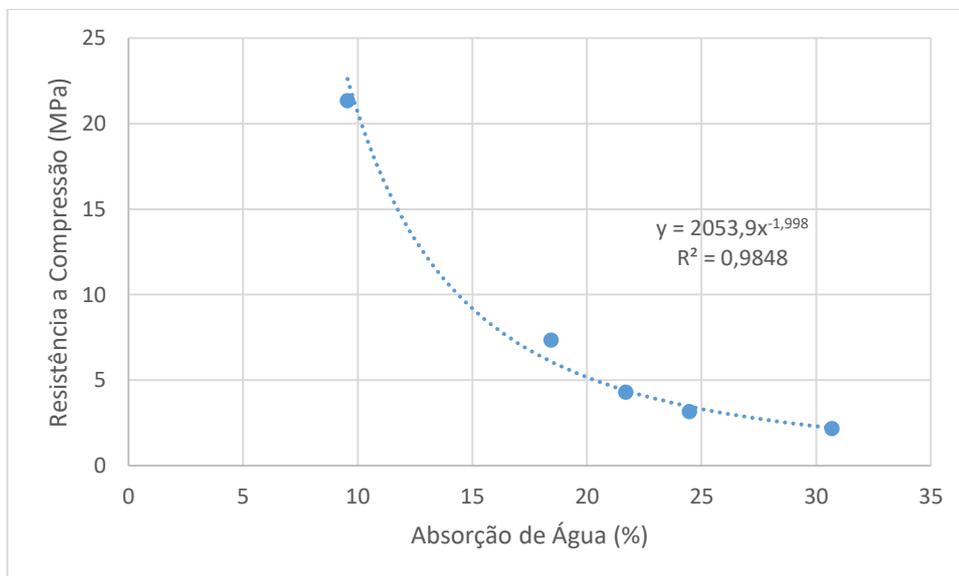
Fonte: Autor (2016).

Figura 25: Relação entre resistência a compressão e porosidade aberta aos 28 dias de cura



Fonte: Autor (2016).

Figura 26: Relação entre resistência a compressão e absorção de água aos 28 dias de cura



Fonte: Autor (2016).

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho foi possível concluir que a vermiculita (VER) influenciou nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas geopoliméricas com adição de nanotitânia ($n\text{TiO}_2$) independente do período analisado.

Os resultados de densidade aparente indicaram que o aumento da dosagem de VER resultou no decréscimo da densidade aparente, sendo a maior variação entre a REF e a amostra com 15% de vermiculita, com $1,933 \text{ g/cm}^3$ e $1,298 \text{ g/cm}^3$ respectivamente, uma redução aproximada de 33%.

Os valores obtidos para a porosidade aberta em relação a resistência a compressão seguem um comportamento inverso ao da densidade aparente descrito pela lei da potência.

Estes resultados mostram a alta capacidade de incorporação de ar da vermiculita, também pela sua propriedade de retenção de água. Considerando uma resistência a compressão aceitável, podemos avaliar a amostra com 10% de vermiculita como o teor ótimo na relação entre resistência a compressão e porosidade aberta.

Os resultados encontrados na porcentagem de absorção de água se mostraram diretamente proporcional as de porosidade aberta e inverso aos de densidade aparente, e foram os que mostraram maior variação, já que a amostra com 15% de VER apresentou um aumento aproximado de 333% de absorção de água em relação a amostra de REF.

A presença da vermiculita demandou maiores teores de água na mistura de modo a manter o espalhamento dentro dos valores pré-estabelecidos. Tais teores foram fundamentais para a variação dos resultados de compressão com 7 dias de cura.

Relativamente a amostra de referência, obteve-se os resultados aos 28 dias de cura de resistência média de 21,35 Mpa (compressão) e 5,73 Mpa (flexão). A amostra de 10% de vermiculita apresentou resultados interessantes com 3,15 Mpa

(compressão) e 1,52 Mpa (flexão), tal formulação atende a normas para o emprego de argamassas de revestimento.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar a influência da Vermiculita sob condições diferentes de cura.

Testar o comportamento do material para período mais prolongado cura.

Estudar o efeito de granulometrias distintas de vermiculita adicionadas sobre as propriedades no estado fresco e endurecido.

Adicionar agregados graúdos de modo a obter um concreto.

REFERÊNCIAS

_____. NBR 7200: **Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1998.

_____. NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão-índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR 13281: **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2005.

BOCA SANTA, R. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel**. 2012. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.

BUCHWALD, A.; DOMBROWSKI, K.; WEIL, M.. **Development of Geopolymer Concrete Supported by System Analytical Tools**. Proceedings of the 2nd Int. Synposiun of Non-tradition Cement and Concrete, ed. by Bilek and Kersner, 25-35, 2005.

Casagrande, C. A. **Estudo da incorporação de partículas de titânica em argamassas fotocatalíticas**. Universidade Federal de Santa Catarina - Dissertação (Mestrado). Florianópolis. 2012.

CIMENTO NO MUNDO. Cimento.org.4/09/2014. Disponível em: <<http://cimento.org/cimento-no-mundo/>>. Acesso em: 10 maio 2016.

Coutinho, S. M., Pretti, S. M., Tristão, F. A., **Argamassa preparada em obra x argamassa industrializada para assentamento de blocos de vedação: Análise do uso em Vitória-ES**. Teoria Prática na Engenharia Civil. v. 21. p. 41-48. 2013.

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

DAVIDOVITS J. **30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs**. *Geopolymer institute. Geopolymer 2002 Conference, October 28-29, 2002, Melbourne, Australia* p,16.

DAVIDOVITS, J., Geopolymer chemistry and properties, **in: J. Davidovits, J. Orlinsl Proceedings of the First European Conference on Soft Mineralogy**, Compiègne, France, v. 1, pp. 25–48, 1988.

Husken, G., Fome, M., Brouwers, H. J. H., **Experimental study of photocatalytic**

concrete products for air purification. Building and Environment. v.44, p. 2463-2474, 2009.

MACCARINI, H. S. **Desenvolvimento de geopolímero a partir do uso de metacaulim.** 2015. 58 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Joinville, 2015.

MARANGON, Eurico et al. **ATIVIDADE POZOLÂNICA DA SÍLICA DA CASCA DE ARROZ PRODUZIDA POR COMBUSTÃO EM LEITO FLUIDIZADO.** IBRACON, Alegrete, v. 1, n. 10, p.1-10, out. 2013. Mensal.

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

Raquel, F., Nogueira, P., Jardim, W. F., **A fotocatalise heterogênea e sua aplicação ambiental.** Química Nova, v. 21, p. 69-72, 1998.

RAMOS, S.O. **Ativação alcalina em peças de cerâmica vermelha.** 2010. 66 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

REFRATIL. Disponível em: <[http:// www.refratil.com.br/produto/vermiculita-expandida />. Acesso em: 04 novembro 2016.](http://www.refratil.com.br/produto/vermiculita-expandida/)

SANTA, R. A. A. B. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel.** 2012. 135 p. Trabalho de conclusão de curso (Mestrado) – Curso de Engenharia de Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Joinville, 2012.

SILVA, E. **Contribuição para utilização de cinza de casca de arroz na construção civil.** 2009. 117 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista.

SILVA, J. C. **A influência da adição de fibras de polipropileno e vermiculita expandida em argamassas com nanotitânia.** 2015. 63 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Joinville, 2015.

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

SOLUÇÕES INDUSTRIAIS. Soluções Industriais.04/11/2016. Disponível em: <[http:// solucoesindustriais.com.br/empresa/maquinas-e-equipamentos/intermetric/produtos/acessorios/maquina-ensaio-universal-/>. Acesso em: 04 novembro 2016.](http://solucoesindustriais.com.br/empresa/maquinas-e-equipamentos/intermetric/produtos/acessorios/maquina-ensaio-universal/)