

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE UMA ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA

Roberta Pinheiro Lopes (IC) e Prof.^a Dr.^a Roberta Nunes Attili Franzin (Orientadora)

Apoio: PIVIC Mackenzie

RESUMO

A sustentabilidade na indústria da construção civil é indispensável, estimulando pesquisas em busca de novos materiais produzidos com teores de cimento reduzidos e com resíduos da própria construção civil e industriais, além de técnicas construtivas inovadoras. Neste cenário, este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento de argamassas geopoliméricas à base de metacaulim e cimento Portland CPIII 32 preparadas com um ativador alcalino de hidróxido e silicato de potássio, e comparar com o comportamento de argamassas convencionais de cimento Portland CPIII 32. Foram produzidas duas argamassas geopoliméricas de mesmo traço com soluções ativadoras alcalinas diferentes, uma com um ativador alcalino produzido em laboratório, a partir de produtos químicos comerciais, e outra a partir de uma solução alcalina comercial pronta. Também foram produzidos dois traços de argamassa convencional. Para todos os materiais foram realizados ensaios de densidade, índice de consistência, ultrassom e resistência à compressão. As argamassas geopoliméricas com os ativadores produzido e comercial alcançaram já nas primeiras idades resistências à compressão elevadas. Os valores encontrados para as respectivas argamassas foram próximos de 33 MPa e 42 MPa, aos 28 dias. Para as argamassas cimentícias estudadas foram encontradas resistências médias de aproximadamente 12 MPa e 36 MPa, aos 28 dias. Estudos adicionais são necessários, mas os resultados obtidos já indicam que o material geopolimérico é interessante para aplicações em que resistências elevadas nas primeiras idades são necessárias.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Geopolímero, Argamassa.

ABSTRACT

Sustainability in the civil construction industry is indispensable, stimulating research in search of new materials produced with reduced cement contents and with waste from civil construction and industrial construction, in addition to innovative construction techniques. In this scenario, this work aimed to study the behavior of geopolymer mortars based on metakaolin and Portland cement CPIII 32 prepared with an alkaline activator of hydroxide and potassium silicate and compare it with the behavior of conventional Portland cement CPIII 32 mortars. Two geopolymetric mortars of the same trait were produced with different alkaline activating solutions, one with an alkaline activator produced in the laboratory, from commercial chemical

products, and the other from a ready-made commercial alkaline solution. Two traces of conventional mortar were also produced. Density, consistency index, ultrasound and compressive strength tests were carried out for all materials. The geopolymeric mortars with the produced and commercial activators already reached high compressive strengths in the first ages. The values found for the respective mortars were close to 33 MPa and 42 MPa, at 28 days. For the cementitious mortars studied, average strengths of approximately 12 MPa and 36 MPa were found at 28 days. Additional studies are needed, but the results obtained already indicate that the geopolymeric material is interesting for applications where high resistance at early ages is required.

Keywords: Sustainability, Geopolymer, Mortar.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a preservação do meio ambiente tem sido evidente nas últimas décadas e isso se deve, principalmente, à consciência de que muitos dos recursos naturais (matérias-primas) utilizados hoje na indústria não estarão disponíveis por tempo ilimitado, e das consequências negativas que a utilização desmedida desses recursos pode trazer para as presentes e futuras gerações.

A indústria da construção civil, segundo Brasileiro e Matos (2015), consome cerca de 50% dos recursos naturais utilizados por todo o setor, além de também ser responsável por uma alta liberação de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, principalmente durante a produção de cimento. De acordo com Vignatti (2012), esse setor é uma das fontes que mais contribui com gases do efeito estufa, gerando cerca de 5% a 8% do total de emissões anuais de CO_2 e outros gases poluentes.

O cimento Portland é um dos materiais mais utilizados na construção, por apresentar alta versatilidade, baixo custo e boa resistência à compressão. Ele é um aglomerante hidráulico produzido a partir do clínquer formado pela calcinação de uma mistura de rocha calcárea e argila. Após a calcinação da mistura, o clínquer formado passa por um processo de moagem, seguida da adição de alguns materiais para a melhoria das propriedades do cimento. Sendo a etapa da produção do clínquer a que mais contribui para a emissão do CO_2 .

Em termos nacionais, de acordo com resultados preliminares do Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC, 2021), somente no primeiro trimestre de 2021, cerca de 15,3 milhões de toneladas de cimento foram vendidas no país, havendo um crescimento de 34,6% quando comparado ao primeiro semestre de 2020. A previsão para 2023 é que haja um aumento de 2,5% no setor da construção civil, de acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2023), contribuindo para o aumento da demanda de cimento.

Assim, em consequência da intensa exploração de recursos naturais no setor da construção civil e da intensa liberação de gás carbônico (CO_2) durante o processo de fabricação de materiais de construção, faz-se necessário a realização de pesquisas que promovam o aprimoramento de técnicas e procedimentos construtivos, além do desenvolvimento de novos materiais que minimizem o consumo de cimento e os impactos hoje gerados na natureza pelo setor.

Com o objetivo de introduzir na indústria da construção civil a utilização de materiais alternativos e sustentáveis, estudos sobre materiais provenientes da ativação alcalina de aluminossilicatos como os geopolímeros tem ganhado força, principalmente devido ao seu alto potencial de aplicação na Engenharia Civil como substituto do cimento Portland, uma vez que apresentam propriedades similares.

No caso dos geopolímeros estima-se uma redução de 40% a 90% de emissão de CO₂ na sua produção, quando comparados com o tradicional cimento Portland (Davidovits, 2013). Além disso, a sua produção consome menos energia, contribui para a preservação de matéria-prima não renovável, e possibilita o uso de resíduos de processos industriais na sua composição. Assim, geopolímeros têm sido estudados com o intuito de serem utilizados, principalmente, como alternativa ao cimento utilizado em concretos (Torgal; Jalali, 2010a), visto que em alguns casos, suas propriedades superam as do convencional cimento Portland (Alves; Nogueira, 2018).

Apesar de haver algumas pesquisas relacionadas à caracterização química, física e mecânica de geopolímeros, ainda se faz necessário que mais pesquisas sejam realizadas, a fim de se estudar a possibilidade de otimização da síntese do material geopolimérico de forma que atenda as características físicas e mecânicas de um material para diversos fins, como revestimento, por exemplo.

O material geopolimérico é um material inorgânico, resultante de uma reação entre precursores sólidos a base de aluminossilicatos e uma solução ativadora a base de hidróxido ou silicato de sódio ou potássio, sendo essa indispensável para a ocorrência da chamada geopolimerização. As propriedades dessa solução ativadora são fundamentais para o processo e qualidade do material formado.

Nesta pesquisa buscou-se analisar algumas propriedades físicas e mecânicas de argamassas geopoliméricas preparadas com metacaulim e ativadores alcalinos a base de hidróxido e silicato de potássio (solução comercial pronta produzida por uma empresa que produz geopolímeros e solução manipulada no laboratório para este estudo), e comparar com os respectivos resultados obtidos para argamassas convencionais à base de cimento Portland. Os resultados devem contribuir com parâmetros para um melhor entendimento do comportamento das argamassas geopoliméricas, além de contribuir com resultados acerca da solução ativadora, fundamental para a qualidade do geopolímero. Pesquisas como essa são necessárias para melhorar o desenvolvimento desses materiais e de suas potencialidades de aplicação como um material mais sustentável na indústria da construção civil.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O uso de materiais com características semelhantes às dos materiais geopoliméricos não é recente. Registros mostram que as Pirâmides Egípcias, erguidas há cerca de 4500 anos, foram construídas com materiais preparados a partir de pedregulhos de calcário caulínico, provenientes de Gizé, e NaOH produzido no local através de uma mistura de cal, barrilha e água. Para além disso, de acordo com Pinto (2006), estruturas antigas e resistentes

formadas com materiais semelhantes também são encontradas no Panteão Romano, no Coliseu, e nas Termas de Caracala.

Referências sobre a descoberta de materiais alcalinamente ativados datam desde a década de 50 com Nikton Glukhovsky, que estudou a durabilidade de cimentos antigos e observou que grande parte desses cimentos eram compostos por ligantes de base alcalina a partir de aluminossilicatos. Glukhovsky, de acordo com Torgal e Jalali (2010b), foi pioneiro no desenvolvimento de um tipo alternativo de cimento. Mas, foi somente na década de 70 que o termo geopolímero passou a ser difundido para designar este tipo de material, patenteado por Davidovits, que tinha como objetivo pesquisar materiais resistentes ao fogo e não inflamáveis (TORGAL *et al.*, 2012). Seu estudo resultou em um material sílico-aluminoso ativado alcalinamente, que surge através de uma reação de polimerização de materiais naturais, em determinadas condições de temperatura e cura, e abriu portas para uma gama de pesquisas a fim de avaliar e introduzir possíveis aplicações para o material.

Os geopolímeros são polímeros inorgânicos produzidos pela mistura de precursores aluminossilicatos, tais como o metacaulim, cinzas, escórias ou alguns resíduos minerais com uma solução alcalina, e apresentam diversas propriedades de durabilidade e desempenho como elevada resistência à compressão, resistência ao fogo e meios ácidos e baixa condutividade térmica superiores ao cimento Portland. Essas características permitem que eles sejam bons substitutos do cimento usual, material de grande utilização na construção civil, principalmente na produção de argamassas e concretos. As propriedades desses materiais, no entanto, dependem fortemente de fatores como os próprios materiais precursores, do ativador alcalino e de sua concentração, temperatura e tempo de cura, relação sólido/água e pH.

O ativador alcalino impulsiona o efeito pozolânico dos aluminossilicatos e, portanto, apresenta papel relevante nas propriedades do geopolímero. A ativação ocorre a partir da utilização de cátions de origem alcalina e, apesar de haver diversas possibilidades, sódio (Na^+) e potássio (K^+) são os mais utilizados. Os ativadores mais comuns são hidróxidos de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH) e silicatos de sódio (Na_2SiO_3) e potássio (K_2SiO_3). No entanto, é possível misturar um hidróxido com um silicato para aumento de íons alcalinos na solução. Segundo Pinto (2004), os hidróxidos são responsáveis por dissolver as matérias-primas, além de garantir alta alcalinidade à solução, enquanto os silicatos possuem o papel de ligantes.

A geopolimerização ocorre em função da dissolução da sílica e da alumina em um meio alcalino, quando as ligações químicas dos precursores são quebradas formando um gel.

Assim, um fator importante com relação ao ativador alcalino é a concentração molar do produto.

Granizo (1998, apud PINTO 2004, p. 103), que estudou geopolímeros à base de metacaulim conclui que 12 M é a menor concentração capaz de dissolver a sílica e a alumina e, segundo Davidovits (1999, apud PINTO 2004, p. 103), a máxima concentração capaz de produzir a geopolimerização é 20 M. Para Bezerra *et al.* (2013), a natureza e a concentração do ativador alcalino utilizado na produção do material têm grande influência na estrutura e nas propriedades físicas e mecânicas de produtos obtidos a partir da geopolimerização, como a resistência à compressão e densidade aparente do material. E, além de serem importantes para o processo de geopolimerização em si, podem acelerar ou atrasar o processo de formação do geopolímero.

Também para Wang, Li e Yan (2005), a concentração molar tem relação direta com o tempo de reação da geopolimerização e desempenho do material formado. De acordo com os autores, o excesso de hidróxido de potássio pode ocasionar a diminuição da resistência mecânica, além de causar carbonatação, como relata Silva (2019).

Para mais, estudos realizados por Ranjbar (2020) mostram conclusões a respeito da influência de diferentes concentrações molares de ativadores alcalinos em produtos geopoliméricos, apontando que concentrações molares maiores, com 10 M, em idades iniciais, apresentam menor resistência mecânica.

Outro fator importante a considerar são as quantidades de silício e alumínio adequadas para a geopolimerização. As características dos geopolímeros são dependentes das razões molares $\text{SiO}_2/\text{X}_2\text{O}$ ($\text{X} = \text{Na}, \text{K}$), $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{H}_2\text{O}/\text{X}_2\text{O}$ ($\text{X} = \text{Na}, \text{K}$) e $\text{X}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ($\text{X} = \text{Na}, \text{K}$) entre os reagentes da mistura para a geopolimerização.

As soluções ativadoras são preparadas geralmente com pós solúveis ou com soluções aquosas resultantes de combinações de óxidos de um metal alcalino como o Na^+ ou K^+ e sílica em proporções variadas, de forma que as razões molares $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ou $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ das composições são primordiais para o grau de geopolimerização, bem como para as características químicas, físicas, mecânicas e reológicas do material formado. É sugerido em estudos encontrados na literatura que as relações $\text{SiO}_2/\text{X}_2\text{O}$ ($\text{X} = \text{Na}, \text{K}$) e $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ são fortemente responsáveis pela resistência à compressão dos materiais geopoliméricos produzidos. Segundo Yuan *et al.* (2016), o aumento na razão $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ provoca mudança na microestrutura do material, tornando-o mais poroso e resultando em uma diminuição da resistência mecânica.

As razões molares $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ou $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ dos ativadores variam entre aproximadamente 1,6 e 3,2 em boa parte dos estudos encontrados na literatura, sendo

possível observar que quanto menor essa razão, maior é a solubilidade, reatividade e tempo de secagem do material, enquanto a viscosidade diminui.

Há, na literatura, várias pesquisas que buscam caracterizar argamassas geopoliméricas produzidas com diferentes materiais precursores e soluções ativadoras, em função da temperatura e tempo de cura.

Santarém (2018) caracterizou argamassas geopoliméricas à base de metacaulim e cinza de fundo provenientes de olarias, utilizando ativador alcalino à base de hidróxido de Sódio (NaOH) em sua composição. Foi realizada a substituição do agregado miúdo por cinza (25%, 50% e 100%). O estudo em questão observou que as resistências à compressão variaram em função da relação Si:Al do ativador alcalino. Para corpos de prova com idade de 7 dias, o autor obteve resistências médias que chegaram a 43,78 MPa, para uma relação Si:Al = 3,5:8 da solução ativadora. No estudo, o autor observou a influência da cinza em acelerar o processo de início de pega dos materiais e mostrou possibilidade de utilização das argamassas produzidas para aplicação em serviços da construção civil, sendo eles para fins estruturais, revestimento, e assentamento de blocos.

Vasconcelos *et al.* (2011) realizaram um vasto estudo experimental sobre o uso de argamassas geopolimérica com metacaulim e ativador alcalino com solução de hidróxido e silicato de sódio para fins de *retrofit*. Foram preparadas composições de argamassas com variação da proporção de massa areia/ligante e a concentração de hidróxido de sódio, componente do ativador alcalino. Os resultados mostraram alta resistência mecânica das argamassas, atingindo resultados superiores à 30 MPa na idade de 7 dias, além disso, atingiram também boa adesão ao substrato de concreto. A pesquisa relata que argamassas geopoliméricas com uma baixa relação areia/aglomerante possuem baixa adesão ao substrato de concreto o comportamento de retração deduzido.

Centeio (2011) realizou um estudo em que comparou o comportamento de argamassas cimentícias com argamassas geopoliméricas à base de lamas residuais e solução ativadora de silicato de sódio e hidróxido de sódio, com concentração molar de 10M. Os resultados mostraram que as argamassas geopoliméricas produzidas, quando comparadas com as argamassas convencionais com ar incorporado, apresentaram melhores resultados de resistência à compressão, mesmo em idades iniciais, e atingindo valor próximo à 16 MPa aos 28 dias de idade. Entretanto, quando foi realizada uma comparação entre argamassas sem ar incorporado, a argamassa cimentícia apresentou, exceto em idades iniciais, maior valor de resistência à compressão, atingindo valor próximo de 25 MPa aos 28 dias de idade.

Comparadas às argamassas cimentícias, argamassas geopoliméricas possuem melhor desempenho quando expostas à ambientes com temperaturas elevadas (Mane; Jadhav, 2012) e podem apresentar menor grau de expansão, tornando a estrutura mais densa e compacta (Alves, 2017). Ainda, segundo Jiménez, Lodeiro e Palomo (2007), materiais geopoliméricos respondem melhor ao ataque ácido do que materiais cimentícios.

Ao realizar um estudo comparativo entre argamassas geopoliméricas com diferentes ativadores alcalinos, Rocha (2017) produziu argamassas geopoliméricas com hidróxido e silicato de potássio e sódio. Os resultados da resistência, nos ensaios de resistência à compressão, foram maiores para aquelas preparadas com silicato de sódio em sua formulação do que as obtidas para o material preparado com silicato de potássio, alcançando 71,9 MPa aos 7 dias de idade, enquanto a média dos valores obtidos para as outras argamassas se mantiveram em torno de 37,3 MPa. Já para ensaio do Índice de Consistência, a argamassa que apresentou maior índice também foi a argamassa com silicato de sódio em sua formulação, alcançando valores de 267,0 mm, enquanto a média do restante das argamassas geopoliméricas produzidas se manteve em 189,33 mm.

Segundo Khan, Sanchez e Zhou (2020), esses materiais também podem ser formulados de tal maneira que suas propriedades sejam ajustadas para utilização em impressão tridimensional na construção civil, técnica construtiva inovadora e relativamente recente no setor.

A argamassa geopolimérica apesar de apresentar potencial de utilização e até potencial de substituição de argamassas cimentícias em determinados casos, como em ambientes em contato com ácidos, água e altas temperaturas, ainda é um material pouco utilizado. Para uso de forma efetiva no país e no mundo, é necessário o aprimoramento das propriedades das misturas geopoliméricas e o desenvolvimento de normas apropriadas que atestem o desempenho desses materiais e a viabilidade de uso para diferentes fins. Portanto, pesquisas sobre o tema são importantes e relevantes para que esse material possa ser utilizado amplamente na construção civil.

3. METODOLOGIA

Este projeto foi desenvolvido por meio de pesquisa experimental nos Laboratórios da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

Argamassas geopoliméricas à base de metacaulim (aluminossilicato) ativados por soluções alcalinas concentradas de hidróxido e silicato de potássio (KOH e K_2SiO_3) foram produzidas, tanto com um ativador alcalino manipulado no próprio laboratório, quanto com um ativador comercial específico para produção de argamassas geopoliméricas, da marca Geo-Pol, para fins de comparação. Ainda, para fins de comparação de algumas características

físicas e mecânicas dos materiais geopoliméricos estudados, foram preparadas argamassas de revestimento convencionais, à base de cimento Portland.

O ativador alcalino a base de silicato e hidróxido de potássio manipulado no laboratório teve concentração fixada em 15M e foi preparado utilizando-se silicato de potássio da marca Diatom (K2140G), Hidróxido de Potássio (KOH) em lentilhas P.A. da marca Neon e água deionizada. Após a determinação da massa dos materiais constituintes da mistura em balança de resolução 0,01 g, os componentes foram misturados e mantidos em agitação magnética por 24h em baixa velocidade e temperatura ambiente para homogeneização da mistura.

Neste trabalho optou-se por se definir o ativador a ser utilizado em função da razão molar $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$. Foram preparadas três diferentes soluções com razões 2,0, 1,8 e 1,6, e usadas na preparação de argamassas geopoliméricas, para um estudo prévio de resistência à compressão desses materiais.

Para cada solução, foram preparadas as misturas geopoliméricas, moldados 3 corpos de prova cilíndricos de dimensões 50 mm × 100 mm e realizados testes de resistência à compressão nas idades 7, 14 e 28 dias, de acordo com as normas ABNT NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016a) e ABNT NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018).

Os resultados desses ensaios levaram à escolha da solução de razão molar 1,6 para a produção do material analisado nesta pesquisa. A Tabela 1 apresenta a composição em massa da solução ativadora selecionada.

Tabela 1: Composição do Ativador Alcalino selecionado.

Material	Massa (g)
Água Deionizada	95,13
Hidróxido de Potássio (KOH)	80,52
Silicato de Potássio (K_2SiO_3)	500,00

Fonte: Os autores (2022)

Para a preparação de uma argamassa geopolimérica é necessário que em sua composição haja pelo menos uma fonte de aluminossilicato e, assim como o cimento, o metacaulim (MK) é uma fonte de aluminossilicato. Nessa pesquisa foi utilizada a combinação do metacaulim adquirido da Geo-Pol e cimento CPIII 32 da marca CSN. Este último, embora desnecessário foi usado como fonte adicional de aluminossilicato e de cálcio, que pode acelerar o tempo de pega do material. Vale ressaltar que esse tipo de cimento é o mais sustentável dentre as diferentes classes de cimento Portland, uma vez que utiliza elevados teores de escória de alto-forno. Além disso, foi utilizada areia normalizada (#100), segundo a ABNT NBR 7214 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), originária do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

A composição em massa das argamassas geopoliméricas é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição das Argamassas Geopoliméricas.

Composição em massa das Argamassas Geopoliméricas				
Traço	Metacaulim (g)	CP III (g)	Ativador Alcalino (g)	Areia (g)
Argamassa Geopolimérica I e II	1 290,03	500,07	2 667,29	5 540,03

Fonte: Os autores (2022)

A Argamassa Geopolimérica I corresponde à argamassa produzida com a ativador manipulado no laboratório e a Argamassa Geopolimérica II é aquela produzida com o ativador comercial produzido pela Geo-Pol. Ambas as argamassas foram produzidas da mesma forma e submetidas aos mesmos ensaios.

Para o metacaulim utilizado realizou-se ensaio de espectrometria por fluorescência de raios X a fim de identificar a composição química do material.

Inicialmente mediu-se as massas dos materiais constituintes em balança de resolução 0,01 g. Em seguida, os materiais secos (cimento, areia e metacaulim) foram misturados em uma argamassadeira mecânica e, de forma lenta e com velocidade constante, foi adicionado o ativador alcalino, até que o material estivesse completamente misturado e homogêneo.

Considerando a ausência de normas ou instruções técnicas relacionadas a argamassas geopoliméricas, os procedimentos e ensaios adotados foram realizados com base em normas referentes às argamassas cimentícias convencionais.

No estado fresco, dois ensaios foram realizados: o ensaio de índice de consistência e determinação de densidade. O ensaio para a determinação do índice de consistência permite avaliar a fluidez das argamassas produzidas e determinação da densidade de massa permite relacionar a massa do material com o volume em que ele ocupa.

O ensaio de consistência foi realizado segundo a norma ABNT NBR 13276 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016b). Para o ensaio, utilizou-se certa quantidade de argamassa suficiente para preencher uma estrutura padronizada, em formato de tronco de cone. Posteriormente, com o recipiente preenchido e colocado sobre uma mesa *Flow Table*, removeu-se a estrutura e, de forma contínua, foram aplicados 15 golpes consecutivos na mesa em que o material foi disposto. O espalhamento foi determinado com o auxílio de uma régua metálica de resolução 0,5 mm.

Para a determinação da densidade foi utilizada a norma ABNT NBR 13278 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

Na sequência, foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos de dimensões 50 mm × 100 mm (diâmetro × altura) para cada argamassa geopolimérica produzida, de acordo com a norma ABNT NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016a).

Após desmoldados, os corpos de prova foram embalados em filme plástico e curados em temperatura ambiente até a idade dos ensaios a serem realizados no estado endurecido.

Nesse estado, e para as idades 1, 3, 7, 14 e 28 dias foram realizados ensaios de determinação da intensidade de propagação de onda ultrassônica segundo a norma ABNT NBR 8802 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019) e ensaios de resistência à compressão pela norma ABNT NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018), por meio de uma mesa de ensaios universal.

Para fins de comparação, duas argamassas cimentícias foram preparadas. Em ambos os casos se utilizou o traço de referência 1:3 (cimento:areia), porém com diferentes granulometrias de areia e relação água/cimento, como pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição das Argamassas Cimentícias.

Composição em massa das Argamassas Cimentícias						
Traço 1:3	Areia #100 (g)	Areia #30 (g)	Areia #50 (g)	Areia #16 (g)	Cimento (g)	Água (g)
Argamassa Cimentícia I	4500,04	-	-	-	1500,44	580,68
Argamassa Cimentícia II	1125,30	1125,10	1125,6	1125,30	1500,10	870,50

Fonte: Os autores (2023).

Para o preparo das argamassas convencionais utilizou-se CSN CPIII 32 e areia normalizada do IPT.

Inicialmente foi realizada a separação e dosagem dos materiais, depois o preparo da massa na argamassadeira mecânica por meio da mistura dos materiais secos com posterior adição de água. Ainda em estado fresco, foram realizados os ensaios de determinação do índice de consistência e determinação da densidade. Para cada traço, 3 corpos de prova cilíndricos de dimensões 50 mm × 100 mm foram moldados e curados em água. No estado endurecido, foram realizados ensaios de ultrassom e resistência à compressão nas idades 1, 3, 7, 14 e 28 dias, assim como feito para as argamassas geopoliméricas. Todos os procedimentos e ensaios realizados seguiram as mesmas normas descritas previamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados da análise por fluorescência de raios X para o metacaulim (Tabela 4), além daqueles obtidos nos ensaios realizados no estado fresco e endurecido para as argamassas geopoliméricas e cimentícias estudadas.

Tabela 4 - Composição Química do Metacaulim.

Elemento - Concentração (Wt %)				
Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
32,297	51,945	1,774	3,063	5,700

*elementos com teores percentuais individuais menores que 0,8%: Cl, Cr₂O₃, Mn₂O₃, CaO, ZnO e SrO

Fonte: Os autores (2023).

O resultado da fluorescência mostra que a composição química do metacaulim é maioritariamente composta por Al_2O_3 e SiO_2 , como esperado.

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos para o índice de consistência e, conseqüentemente, avaliação da fluidez dos materiais produzidos neste trabalho, tanto para a argamassa geopolimérica produzida com a solução ativadora manipulada no laboratório com $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O} = 1,6$ (Argamassa Geopolimérica I), quanto para a argamassa geopolimérica produzida com o ativador comercial Geo-Pol (Argamassa Geopolimérica II) e para as argamassas cimentícias convencionais com areia de granulometria única (Argamassa Cimentícia I) e com areia de granulometrias variadas (Argamassa Cimentícia II).

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de Determinação do Índice de Consistência.

Material	Diâmetro (mm)
Argamassa Geopolimérica I	222,0
Argamassa Geopolimérica II	350,0
Argamassa Cimentícia I	282,4
Argamassa Cimentícia II	171,4

Fonte: Os autores (2023).

Em relação ao ensaio de índice de consistência, a Argamassa Geopolimérica II apresentou o maior diâmetro médio, quando comparado com as demais argamassas, o que indica que esse material apresentou maior fluidez.

Embora algumas normas apresentem valores esperados para ensaios normatizados, a norma para a determinação do índice de consistência não apresenta referências a respeito do desempenho esperado do ensaio executado.

O ensaio de densidade foi realizado para comparação entre as argamassas produzidas, visto que este é um parâmetro de caracterização do material. O objetivo é verificar as uniformidades e mudanças físicas apresentadas em uma mistura. Os valores obtidos das densidades das argamassas em estado fresco estão apresentados na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6 – Resultados da densidade das argamassas em estado fresco.

Material	Densidade de massa (g/cm^3)
Argamassa Geopolimérica I	2,14
Argamassa Geopolimérica II	2,20
Argamassa Cimentícia I	6,10
Argamassa Cimentícia II	6,26

Fonte: Os autores (2023).

Pode-se observar que os valores de densidade obtidos para as argamassas cimentícias são próximos entre si e maiores que aqueles obtidos para as argamassas geopoliméricas I e II, que também mostraram similaridade. Os resultados obtidos para as argamassas geopoliméricas também não mostram diferença significativa em função das diferentes soluções ativadoras utilizadas.

Centeio (2011), que produziu e estudou argamassas geopoliméricas à base de lamas residuais, encontrou valores de densidades que variaram de 2,85 a 3,25 g/cm³. Valores ligeiramente maiores que os encontrados nas argamassas geopoliméricas produzidas nesta pesquisa.

Os resultados dos ensaios de ultrassom, que correspondem às intensidades médias com que ondas longitudinais se propagam através de pulsos ultrassônicos pelas peças analisadas, e que têm o objetivo de analisar o material em relação à sua uniformidade e a detecção de defeitos na peça, estão apresentados na Tabela 7. Os valores correspondem aos resultados obtidos para os corpos de prova nas idades de 1, 3, 7, 14 e 28 dias para todos os traços produzidos de argamassas, sendo estas geopoliméricas e cimentícias convencionais.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de Ultrassom para corpos de prova de diferentes idades.

Material	Velocidade das Ondas Ultrassônica (m/s)				
	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
Argamassa Geopolimérica I	2716,50	2940,25	2997,75	3100,75	2791,00
Argamassa Geopolimérica II	3179,50	3179,50	3096,00	3118,75	3297,50
Argamassa Cimentícia I	1807,67	3086,67	2948,33	3228,33	4136,67
Argamassa Cimentícia II	3026,67	3688,33	3844,67	3975,00	3536,67

Fonte: Os autores (2023).

É sabido que quanto maior a intensidade alcançada, menor a quantidade de espaços vazios do material e, portanto, melhor a compacidade do corpo de prova, o que pode acarretar melhor resistência à compressão.

Como observado na tabela acima, os valores das velocidades médias variaram entre aproximadamente 1808 e 4137 m/s. Dos corpos de provas analisados, apenas os corpos de prova da Argamassa Cimentícia II com idade de 1 dia apresentou velocidade menor que 2000 m/s. Os resultados parecem indicar que as argamassas geopoliméricas apresentaram maior volume de vazios na sua estrutura, o que pode interferir no desempenho do material a longo prazo, podendo levar a deformações e queda da resistência do material.

Para avaliar os resultados obtidos no ensaio, foi utilizada também a classificação de qualidade de Bauer (2019), apresentada no Quadro 1. Apesar de não conferir caráter de norma técnica, a classificação de qualidade de Bauer apresenta valores característicos e esperados para a qualidade de concreto através do ensaio de Ondas Ultrassônica.

Quadro 1 – Classificação de qualidade segundo onda ultrassônica.

Intensidade da Onda Ultrassônica (m/s)	Qualidade do Concreto
V > 4500	EXCELENTE
3500 < V < 4500	ÓTIMO
3000 < V < 3500	BOM
2000 < V < 3000	REGULAR
V < 2000	RUIM

Fonte: Bauer, L.A. (2019, p.391, v.1).

Embora esta pesquisa estude a viabilidade de argamassas, ainda não há referências ou normas técnicas que falem a respeito do desempenho esperado de argamassas geopoliméricas ou cimentícias diante do ensaio de ondas ultrassônicas, portanto, foi realizado algumas observações levando em consideração os valores das análises obtidas através do ensaio em peças de concreto.

Para a argamassa geopolimérica I observa-se que a velocidade de propagação de ondas aumenta com a idade até 14 dias, com queda aos 28 dias. Uma justificativa para a diminuição da dessa velocidade após certa idade pode ser o fato de os ensaios terem sido realizados em corpos de provas distintos, que apesar de serem de mesmo traço e seguirem a mesma metodologia de moldagem e cura, podem ter respondido de maneiras diferentes à compactação do material durante a moldagem dos corpos de prova. Para todas as idades com exceção de 14 dias a classificação de Bauer é “regular”. A argamassa geopolimérica II apresentou classificação “boa” em todas as idades, segundo a mesma classificação.

Os melhores resultados dentre todos os traços estudados, alcançando classificação “ótima” foram obtidos para as argamassas cimentícias I e II.

Os resultados obtidos para os ensaios de resistência à compressão para todos os materiais estudados nas diferentes idades são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados de resistência média à compressão para diferentes idades.

	Resistência Média à Compressão (MPa)				
	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
Arg.Geopolimérica I	16,71 ± 0,94	27,52 ± 0,40	27,34 ± 2,55	34,84 ± 6,35	33,25 ± 5,88
Arg. Geopolimérica II	14,59 ± 4,01	29,06 ± 1,92	34,31 ± 5,24	31,1 ± 5,80	42,45 ± 2,37
Arg. Cimentícia I	0,82 ± 0,12	3,49 ± 0,15	4,93 ± 0,17	7,15 ± 0,41	11,58 ± 0,20
Arg. Cimentícia II	3,32 ± 0,29	12,6 ± 0,29	18,45 ± 0,59	26,17±1,26	35,92 ± 0,68

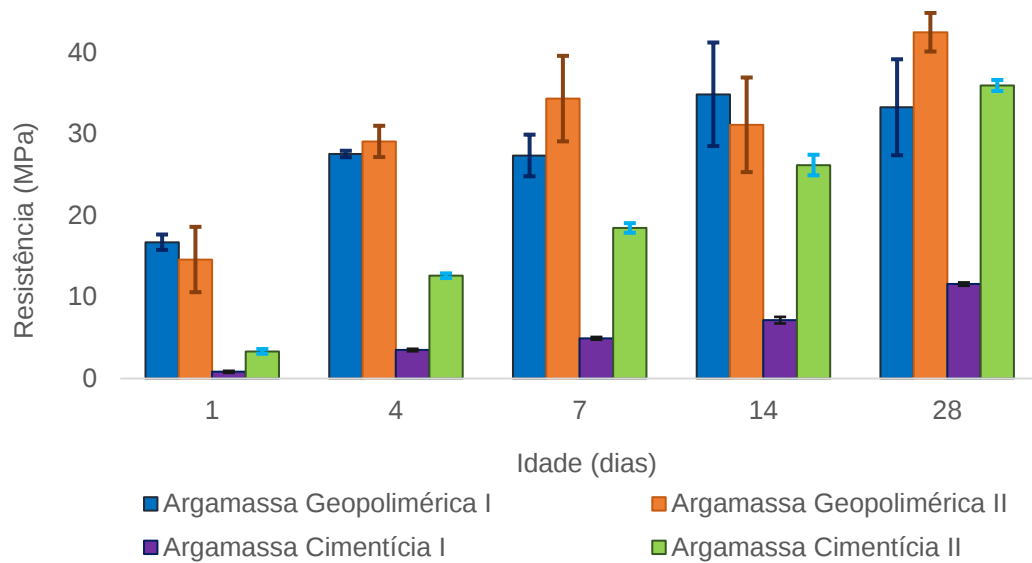
Fonte: Os autores (2023).

Os valores apresentados da resistência à compressão correspondem à média aritmética dos resultados obtidos para os diferentes corpos de prova de cada traço.

Conforme apresentado, os resultados do ensaio de ultrassom parecem indicar quais argamassas possuem maior volume de vazios, característica que pode influenciar diretamente na resistência à compressão da peça, visto que quanto maior a quantidade de vazios, menor a resistência do material. Dessa maneira, é possível observar que, das argamassas produzidas, a que alcançou menor resistência à compressão, também obteve menor velocidade no ensaio de ultrassom, caracterizando a peça com maior índice de vazios. Dessa maneira, é possível verificar essa relação presente através dos resultados dos ensaios realizados na Argamassa Cimentícia I.

Para uma melhor visualização desses resultados e do comportamento da resistência à compressão com a idade para todos os materiais vale observar o Gráfico 1.

Gráfico 1 – Resultados do ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Os autores (2023).

Nas Fotografias 2(a) e 2(b) é possível observar um corpo de prova posicionado para o ensaio de resistência à compressão e os quatro corpos de prova de mesmo traço e idade após rompimento.

Fotografia 2 – (a) Corpo de prova posicionado para ensaio de resistência à compressão (b) Corpos de prova após o ensaio.



(a)



(b)

Fonte: Os autores (2022).

As argamassas geopoliméricas, mesmo em idades iniciais apresentaram resistência maiores que as argamassas cimentícias convencionais produzidas. Apenas aos 28 dias, a argamassa cimentícia II, que é composta com areia de diferentes granulometrias, apresenta resultado de resistência à compressão comparável à da argamassa geopolimérica I.

Centeio (2011), em seu estudo, realizou uma comparação entre argamassas geopoliméricas e cimentícias com e sem ar incorporado. As argamassas geopoliméricas foram produzidas a partir de um ativador alcalino de silicato de sódio e hidróxido de sódio e obtiveram valores de resistência menores que os valores apresentados nesta pesquisa. Mesmo com idade de 28 dias, a argamassa geopolimérica com ar incorporado atingiu resistência próxima de 12 MPa, enquanto a argamassa geopoliméricas sem ar adicionado alcançou resistência próxima de 16 MPa. Quando comparadas com as argamassas

geopoliméricas desta pesquisa, ambas (Argamassa Geopolimérica I e II) apresentam valores superiores aos apresentados na referência, sendo 33,25 e 42,45 MPa, respectivamente.

No estudo de Centeio (2011) observa-se que a argamassa cimentícia com ar incorporado atingiu resistência próxima de 15 MPa e a argamassa cimentícia sem ar incorporado 25 MPa. Aqui, a argamassa cimentícia I apresentou resultado próximo ao do autor para a argamassa com ar incorporado (≈ 12 MPa) e um valor significativamente maior (≈ 36 MPa) para a argamassa cimentícia II, comparando-se com as duas argamassas estudadas pelo autor.

Observa-se na literatura que a maior parte dos estudos se dá para argamassas geopoliméricas com ativadores alcalinos de hidróxido de potássio ou sódio. Segundo estudo de Zhang *et al.* (2007), materiais geopoliméricos à base de metacaulim, preparados com maiores concentração de Na^+ , atingem maiores resistências à compressão, do que sistemas com K^+ .

Em um estudo comparativo entre argamassa geopolimérica (utilizando ativador alcalino à base de sódio) e argamassa cimentícia, Pontes, Geraldo e Camarini (2017) apresentaram resultados de resistência à compressão próximos de 40 MPa para argamassa cimentícia os 28 dias, e valores próximos à 20 MPa para argamassas geopoliméricas. A resistência média para as argamassas geopoliméricas produzidas mostrou ser 60% inferior quando comparadas com as argamassas cimentícias, mesmo em idades iniciais. Ao contrário dos estudos anteriores, esta pesquisa não evidenciou vantagem quanto ao desempenho mecânico das argamassas geopoliméricas.

Ao analisar os resultados do ensaio de compressão desta pesquisa, pode-se observar que apesar das altas resistências atingidas, as argamassas cimentícias precisaram de um período maior para alcançarem resistência significativa, quando comparado com as argamassas geopoliméricas. O que mostra que para aplicações em que a resistência nas primeiras idades é importante, o material geopolimérico seria mais indicado.

Como pode ser observado, de todas as argamassas estudadas, a argamassa geopolimérica II (produzida a partir de ativador alcalino comercial) apresentou melhor resultado de resistência à compressão aos 28 dias, maior inclusive que a resistência da argamassa cimentícia produzida com diferentes granulometrias de areia (argamassa cimentícia II).

De acordo com o que já descrito, alguns parâmetros da solução ativadora como sua concentração e as razões $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ e $\text{H}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ são importantes para a geopolimerização e, consequentemente, para a qualidade da mistura geopolimérica. Nessa pesquisa, apenas a relação $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ foi ajustada. Sendo também necessário avaliar e ajustar a quantidade de

água, principalmente se for considerado que o silicato de potássio utilizado na solução manipulada no laboratório já possuir água em sua composição, parâmetro que foi ignorado. O excesso de água da solução pode ter influenciado a resistência média à compressão do material produzido com ela, quando comparado com a argamassa geopolimérica feita com o ativador comercial. Vale ressaltar, no entanto, que a diferença não é significativa quando se considera os respectivos desvios-padrão.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento físico e mecânico de argamassas geopoliméricas de metacaulim preparadas com uma solução de hidróxido e silicato de potássio, e comparar com o comportamento de argamassas convencionais à base de cimento Portland.

Foi observado que quando comparadas com argamassas cimentícias convencionais, as argamassas geopoliméricas apresentaram bons resultados de resistência à compressão. Aos 28 dias, o melhor resultado foi obtido para a argamassa geopolimérica produzida com o ativador comercial (≈ 42 MPa), seguido da argamassa cimentícia preparada com areia de granulometria variada (≈ 36 MPa), depois pela argamassa geopolimérica produzida com o ativador alcalino preparado no laboratório (≈ 33 MPa) e pela argamassa cimentícia preparada com uma única granulometria de areia (≈ 12 MPa). Essa última com resistência bastante inferior às demais.

A partir dos resultados também é possível observar que as argamassas geopoliméricas ganham resistências elevadas já nas primeiras idades, se mostrando interessantes para aplicações em que resistência alta nas idades iniciais são relevantes.

Comparando os resultados de resistência à compressão das duas argamassas geopoliméricas estudadas, é possível concluir que o ativador alcalino manipulado no laboratório se mostrou eficiente, apesar de a argamassa produzida com o ativador comercial ter apresentado uma resistência cerca de 21% maior, desconsiderando os desvios-padrão. Vale citar, no entanto, ser importante avaliar e controlar a quantidade de água da solução alcalina para um melhor desempenho do processo de geopolimerização e das propriedades físicas e mecânicas do material geopolimérico formado.

É importante salientar que, apesar de o ensaio de resistência à compressão não ser considerado um parâmetro significativo na caracterização de argamassas, é comum a realização deste ensaio. Das principais características a serem avaliadas em argamassas, pode-se citar seu desempenho quanto à trabalhabilidade, tempo de pega, resistência à tração, capacidade de reter água e boa aderência (fator importante principalmente em argamassas de assentamento/revestimento). Assim, para trabalhos futuros sugere-se avaliar as

propriedades descritas para argamassas geopoliméricas com e sem a adição de cimento Portland, lembrando que ausência do cimento torna o material mais sustentável.

Além disso, sugere-se estudar a influência da temperatura de cura das argamassas geopoliméricas, uma vez que há indícios na literatura de que as propriedades do material melhoram com o aumento dessa temperatura e a influência das razões molares $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{H}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ e $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ entre os reagentes da mistura para a geopolimerização.

6. REFERÊNCIAS

- ALVES, C.V. Avaliação da reação álcali-agregada em argamassas produzidas com geopolímeros de lodo de caulim calcinado e agregados de ágar reciclada. 2017. Núcleo orientado para a inovação das edificações. Projeto de Iniciação Científica da Universidade do Rio Grande de Sul. Porto Alegre, 2017. **Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ALVES, S.N.; NOGUEIRA, A.S. O uso de Geopolímeros como alternativa sustentável na construção civil. Revista Projectus. v.3, n.4, 2018. Centro Federal de Educação Tecnológica. Disponível em: <https://revistas.unisuam.edu.br/index.php/projectus/article/view/287>. Acesso em: 10 de mar. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação do índice de consistência. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**: Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- BAUER, L.A. Falcão. Materiais de construção. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. p. 542, v1.
- BEZERRA, I.M.T.; COSTA, D.I.; VITORINO, J.P.M.; MENEZES, R.R.; NEVES, G.A. Influência da proporção do ativador alcalino nas propriedades mecânicas de materiais ativados alcalinamente. Revista Eletrônica de Materiais e processos. Campina Grande, v.8.2, p. 101-105, jun. 2013. Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/340/282>. Acesso em: 8 mar. 2021.
- BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica** 61. v. 358, n.1. 2015,

Universidade Federal do Piauí. (SciELO). Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/8v5cGYtby3Xm3Snd6NjNdtQ/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 22 de mar. 2021.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CONCRETO (CBIC). **Indústria da construção prevê crescimento de 2,5% em 2023**. Disponível em: <https://cbic.org.br/industria-da-construcao-preve-crescimento-de-25-em-2023/>

CENTEIO, J.C.S. **Propriedades físicas de argamassa geopolimérica de lamas residuais das minas da Panasqueira**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e construção) – Universidade de Beira Interior, Corvilhã, 2011.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Cement: a review**. Saint-Quentin: França, 2013.

JIMÉNEZ, A.F.; LODEIRO, I.G.; PALOMO, A. Durability of alkali- activated fly ash cementitious materials. **Journal of Materials Science**. v.42, p.3055-3065, 2007. (Advances in geopolymer science & technology). Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.476.9632&rep=rep1&type=pdf>.

KHAN, M.S.; SANCHEZ, F.; ZHOU, H. 3-D printing of concrete: Beyond horizons. **Cement and Concrete Research**. v. 133, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884619315868>

MANE, S.; JADHAV, H.S. Investigation of Geopolymer Mortar and Concrete Under High Temperature. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. v.2, dez. 2012. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.414.4307&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 15 de abr. 2021.

PINTO, A.T. **Sistemas Ligantes Obtidos por Ativação Alcalina do Metacaulino**. 2004. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, 2004.

PINTO, A.T. **Introdução ao estudo dos geopolímeros**. Vila Real, 2006. Disponível em: <http://www.geopolimero.com.br/PDF/introducao.pdf>. Acesso em: 17 de abr. 2021.

PONTES, F.S.; GERALDO, R.H.; CAMARINI, G. Estudo do desempenho de argamassas geopoliméricas produzidas com sílica das cinzas de casca do arroz. Trabalho apresentado na XXV Congresso de Iniciação à Inovação. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

RANJBAR, N.; AMIN, K.; GUANG Y.; MEHDI, M. Effects of heat and pressure on hot-pressed geopolymer. **Construction and Building Materials**, jan. 2020. Disponível em: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/201071074/Effects_of_heat_and_pressure_on_hot_pressed_geopolymer.pdf. Acesso em: 20 de maio, 2023.

ROCHA, T.S. **Argamassas geopoliméricas com diferentes ativadores e seus comportamentos frente à elevação da temperatura**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos do Goytacazes, 2017.

SANTARÉM, S.S. **Síntese e caracterização de argamassa geopolimérica a base de metacaulinita e cinza de fundo**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018.

SILVA, J.V. **Síntese e caracterização de Geopolímeros macroporosos com uso de peróxido de hidrogênio**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Resultados Preliminares de Março 2021**. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/resultados-preliminares/1618325530.pdf>. Acesso em: 20 de abril de 2022.

TORGAL, F. P.; ABDOLLAHNEJAD, Z.; MIRALDO, S.; BAKLOUTI, S.; DING, Y.. 2012. An overview on the potential of geopolymers for concrete infrastructure rehabilitation. **Construction and Building Materials**, mai. 2012. Disponível em: https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/20356/1/Pacheco-Torgal_2012_Rehabilitation.pdf. Acesso em: 18 de mar. 2021.

TORGAL, F.P.; JALALI, S. Ligantes Geopoliméricos. Uma Alternativa ao Cimento Portland? *Ingenium*. jul. 2010a. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/55611384.pdf>.

TORGAL, F.P.; JALALI, S. Cimento Portland normal versus ligantes geopoliméricos: durabilidade e desempenho ambiental. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, n.15, p.1-9. abr. 2010b. Disponível em: http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/10733/1/Art1_N15.pdf

VASCONCELOS, E.; FERNANDES, S.; BARROSO, A.J.L.; PACHECO, T.F. **Concrete retrofitting using metakaolin geopolymer mortars and CFRP**. *Construction and Building Materials*, vol. 25, p. 3213–21, ago. 2011.

VIGNATTI, R. **Geopolímeros Aplicados à Engenharia Civil**. Trabalho apresentado na XXI Feira de Iniciação à Inovação e ao desenvolvimento tecnológico. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

WANG, H; LI, H.; YAN, F. Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, vol. 31, p. 1-6, out. 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927775705000804?via%3Dihub>

YUAN, J.; HE, P.; JIA, D.; YANG, C.; ZHANG, Y.; YAN, S.; YANG, Z.; DUAN, X.; WANG, S.; ZHOU, Y. Effect of curing temperature and SiO₂/K₂O molar ratio on the performance of metakaolin-based geopolymers. **Ceramics International**, vol. 42, edição 14, p. 16184-16190, nov. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272884216312172>

ZHANG, F.; ZHANG, L.; LIU, M.; MU, C.; LIANG, Y.N.; HU, X. Role of alkali cation in compressive strength of metakaolin based geopolymers. **Ceramics International**, 3811-3817, mar. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884216322787>. Acesso em: 18 de mar. 2021.

Contatos: roberta_pinheiro@outlook.com.br e roberta.franzin@mackenzie.br