


Valorização de resíduos de uma indústria de pré-moldados de compósitos geopoliméricos como adição pozolânica

Valuation of waste from a geopolymeric composite precast industry as a pozzolanic addition

Andressa Carvalho Rezende Herrero 

Sergio Botelho de Oliveira 

Resumo

O objetivo deste estudo é caracterizar os resíduos sólidos industriais gerados por uma indústria goiana de pré-moldados de compósitos geopoliméricos e utilizá-los na produção de argamassa, em substituição parcial ao cimento nos teores de 5%, 10%, 15% e 25%, devido ao seu provável efeito pozolânico. Para a pesquisa o resíduo passou por trituração em moinho martelo e peneiramento em malha #40 realizados na própria indústria. Em seguida, foram realizadas análises físico-químicas para verificar se o resíduo atende aos parâmetros estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014b) Materiais Pozolânicos – Requisitos. O resíduo apresentou potencial para ser utilizado como pozolana, pois na análise granulométrica apenas 19% ficaram retidos na peneira #325 e o teor de umidade também atendeu aos parâmetros da referida norma. No entanto o teor de perda ao fogo e o teor de álcalis disponíveis em Na_2O foram maiores do que os requisitos da norma, devido ao fato de o resíduo possuir em sua composição, raspas de pneu e hidróxido de sódio (NaOH). Em relação ao índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, a argamassa que possui em sua composição 5% de resíduo atendeu as condições da norma, mas o desempenho com cal não obteve o resultado desejado, pois a resistência diminuiu. Após análise, percebeu-se que o resíduo não se enquadra como pozolana, mas pode ser usado como enchimento.

Palavras-chave: Adição mineral. Caulinita. Reaproveitamento de resíduos.

Abstract

The objective of this study is to characterize the industrial solid waste generated by a geopolymeric composites precast industry in Goiás and use them in the production of mortar, in partial replacement of cement in the contents of 5%, 10%, 15% and 25%, due to its probable pozzolanic effect. For the research the residue underwent crushing in a hammer mill and sieving in a #40 mesh conducted in the industry itself. Then, physical-chemical analyzes were conducted to verify if the residue meets the parameters established by NBR 12653 (ABNT, 2014) Pozzolanic Materials – Requirements. The residue showed potential to be used as pozzolana, as in the particle size analysis only 19% was retained on sieve #325 and the moisture content also met the parameters of the aforementioned standard. However, the fire loss content and the alkali content available in Na_2O were higher than the standard requirements, because the residue contains tire shavings and sodium hydroxide (NaOH) in its composition. In relation to the performance index with Portland cement at 28 days, the mortar with 5% residue in its composition met the standard conditions, but the performance with lime did not obtain the desired result, as the resistance decreased. After analysis, it has been realized that the residue does not qualify as pozzolan but can be used as a filler.

Keywords: Mineral addition. Kaolinite. Reuse of waste.

¹Andressa Carvalho Rezende Herrero

¹Instituto Federal de Goiás
Goiânia - GO - Brasil

²Sergio Botelho de Oliveira

²Instituto Federal de Goiás
Goiânia - GO - Brasil

Recebido em 04/09/23

Aceito em 17/02/24

Introdução

Com o avanço da tecnologia e o crescimento populacional, houve um aumento nas demandas por diversos produtos, o que contribuiu para geração de grande quantidade de resíduos sólidos. Essa geração desenfreada juntamente com disposição inadequada tem se tornado uma grande preocupação em todo o mundo, tanto pela falta de áreas para disposição final quanto pelos impactos ocasionados à saúde e ao meio ambiente (De Azevedo *et al.*, 2021).

Contudo, diversos setores da sociedade, especialmente as indústrias, têm se conscientizado sobre legislações e políticas de sustentabilidade, tais como redução, reciclagem, reutilização e destinação final. A implementação de um sistema de gestão de resíduos sólidos, efluentes e emissões atmosféricas não apenas influencia a competitividade no mercado, mas também desempenha um papel fundamental na preservação do meio ambiente e na sustentabilidade econômica. Ao adotar práticas eficientes de gestão, as empresas atendem a requisitos regulatórios, contribuem para a redução do impacto ambiental e promovem uma operação mais sustentável, o que pode ter implicações positivas a longo prazo na economia e na qualidade do meio ambiente.

Nas indústrias de construção civil, o Cimento Portland é o material mais utilizado e seu principal constituinte é o clínquer, que é resultado da calcinação de uma mistura de calcário e argila. Mais de 4 bilhões de toneladas de cimento são produzidas por ano no mundo, correspondendo a cerca de 8% das emissões globais de dióxido de carbono (Lehne; Preston, 2023).

Segundo Bacarji *et al.* (2013), uma estratégia para reduzir o uso de clínquer é a substituição de ligantes à base de cimento Portland por enchimentos ou pozolana, que resultaria em benefícios ambientais significativos, como a redução das emissões de CO₂ e a preservação de recursos naturais. As pozolanas são materiais naturais ou artificiais que contêm sílica e/ou aluminato, que reagem quimicamente com o cimento para aumentar a resistência do compósito final.

De acordo com Tailby e Mackenzie (2010), uma alternativa ecologicamente correta é o cimento geopolimérico, pois não há necessidade de calcinação durante a produção. No entanto, como a durabilidade do cimento de geopolímero ainda é desconhecida no longo prazo, um método possível seria misturá-lo em proporções variáveis com o cimento Portland. Estudos comprovam que esse reaproveitamento resultaria na diminuição da emissão de gás carbônico e da energia de produção dos compósitos (De Azevedo *et al.*, 2021).

Os geopolímeros ou ligantes alcalinos são uma nova classe de materiais sustentáveis e inovadores, com propriedades cimentícias que possuem grande potencial de substituição ao cimento Portland. São produzidos a partir da ativação alcalina de materiais ricos em aluminossilicato, presente em materiais naturais e em certos resíduos como escória de alto forno e cinzas volantes (Singh; Middendorf, 2020).

Nesta conjuntura, muitos autores têm realizado estudos com foco no reaproveitamento de resíduos industriais na produção de novos produtos ou componentes, com o principal objetivo de encontrar alternativas para minimizar problemas ambientais e econômicos causados pela disposição inadequada desses resíduos. Esse campo de estudo é conhecido como gerenciamento de resíduos, e busca soluções para o tratamento, a reciclagem e a reutilização dos resíduos gerados por indústrias diversas.

De Azevedo *et al.* (2021) estudaram o potencial de reaproveitamento de lodo da indústria de papel, lodo do processamento de rochas e resíduo de construção e demolição (RCD), como componentes de compósitos cimentícios. Já Bacarji *et al.* (2013) analisaram o reaproveitamento do produto residual da indústria de mármore e granito, como substituto sustentável do cimento. Nesta mesma linha, também há autores que utilizaram materiais com efeito pozolânico na substituição parcial do cimento na produção de argamassas, como Hossain *et al.* (2016) e Zhao *et al.* (2020).

Nesse contexto, uma indústria goiana de artefatos pré-moldados de compósitos geopoliméricos se deparou com um grande desafio, dar destinação aos resíduos não biodegradáveis gerados no processo de fabricação dos seus artefatos. Na indústria utiliza-se uma matéria-prima à base de geopolímero patenteada no ano de 2019, sendo considerada uma matéria-prima relativamente nova para esta finalidade e até o momento não foi encontrada destinação adequada para os resíduos gerados.

Este estudo investigou formas sustentáveis de aproveitamento desse resíduo e agregação de valor ao mesmo, destinando-o a uma aplicação útil, inviabilizando o descarte. A alternativa proposta é a adição deste resíduo cominuído em substituição parcial ao cimento Portland para fabricação de argamassa. Foram realizados ensaios físico-químicos com o resíduo e testes de resistência mecânica com as argamassas contendo o resíduo, para examinar o seu desempenho. Assim, foi analisado se o aproveitamento do compósito residual poderá atuar como adição mineral com efeito pozolânico, devido ao fato de conter em sua composição caulinita (aluminossilicato específico de metais alcalinos e terrosos).

Materiais e métodos

Materiais

O resíduo de compósito geopolimérico (RCG) utilizado neste estudo é derivado de uma indústria goiana de fibrocêrâmica. Esta empresa produz perfis pré-moldados, através da extrusão, para criação de móveis, pergolados e construção de edificações em até quatro pavimentos.

Estes perfis são provenientes de uma matéria-prima patenteada composta por aluminossilicato específico de metais alcalinos e terrosos (argila), pó de granito, pó de pneu, hidróxido de cálcio (cal hidratada), fibras de polipropileno e o hidróxido de sódio (NaOH). O processo de extrusão é o que define a geometria do perfil pré-moldado geopolimérico. Nesse processo, a matéria-prima é direcionada à extrusora onde é compactada e forçada por um pistão ou eixo helicoidal, passando pela matriz formando o perfil.

O resultado da extrusão é uma coluna, com seção transversal específica e dimensões definidas, conforme Figura 1. Os perfis pré-moldados apresentam dimensões padronizadas, com 9 cm de largura para blocos de vedação (6 furos), 10 cm de largura para blocos utilizados para laje (4 furos), 35,5 cm de altura para ambos e com o comprimento variável de até 4,00 m, dependendo da especificação necessária do perfil.

Durante o processo industrial, são geradas aproximadamente 80 toneladas de resíduos por ano, advindos do processo de ajuste das extrusoras, de peças deformadas durante a secagem e de aparas dos perfis no acabamento fino, conforme Figura 2.

Figura 1 - Perfil pré-moldado com 6 furos



Figura 2 - Resíduos da indústria: (a) Aparas dos perfis e (b) peças deformadas



Estes subprodutos industriais apresentam diversos tamanhos e ao realizar os ensaios, para verificar sua viabilidade como material pozolânico, eles necessitam passar por um beneficiamento, ou seja, serem submetidos às operações/processos com objetivo de torná-los mais finos. Sendo assim, a indústria fez a moagem do resíduo e o peneiramento.

Os perfis deformados e as aparas foram triturados em moinho martelo com potência de 25 cv e rotação de 1700 rpm, depois passou por uma peneira vibratória de 1x3 metros com malha #40 por aproximadamente 3 minutos. O material passante na peneira foi coletado e armazenado em sacos de 50 kg. A Figura 3 apresenta o aspecto do resíduo após beneficiamento e peneiramento. A placa de Pétri F mostra o aspecto final do resíduo que foi utilizado no estudo.

Para preparação das argamassas, utilizou-se cimento Portland composto com adição de fíler e resistência à compressão de 32 MPa aos 28 dias (CP II-F-32). A sua caracterização físico-química foi fornecida pelo fabricante e está descrita na Tabela 1.

Para realizar o ensaio de atividade pozolânica com cal foi empregado o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ P.A. com teor mínimo 95%. O agregado miúdo empregado foi a areia padronizada conforme NBR 7214 (ABNT, 2015b) fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), composta por quatro frações (n° 16, n° 30, n° 50 e n° 100). E para melhorar a trabalhabilidade da argamassa utilizou-se o aditivo superplastificante ViscoCrete®-6500. Ele consiste em uma solução de policarboxilato em meio aquoso, de cor marrom e densidade de volume 1,08 +/- 0,02 kg/L. Sua dosagem recomendada é de 0,2% a 1,50% sobre o peso do aglomerante.

Métodos

Os ensaios foram realizados conforme normas da ABNT, principalmente a NBR 12653 (ABNT, 2014b) que apresenta os requisitos para um material pozolânico destinado ao uso com cimento Portland em compósitos cimentícios. No primeiro momento, após o recebimento do resíduo geopolimérico, foi realizada a caracterização físico-química deste. Em seguida, foi determinada a composição das argamassas, para então avaliar a atividade pozolânica das argamassas com cimento e com cal. A Figura 4 apresenta o fluxograma de planejamento geral dos experimentos.

Figura 3 - Aspecto do resíduo após beneficiamento e peneiramento

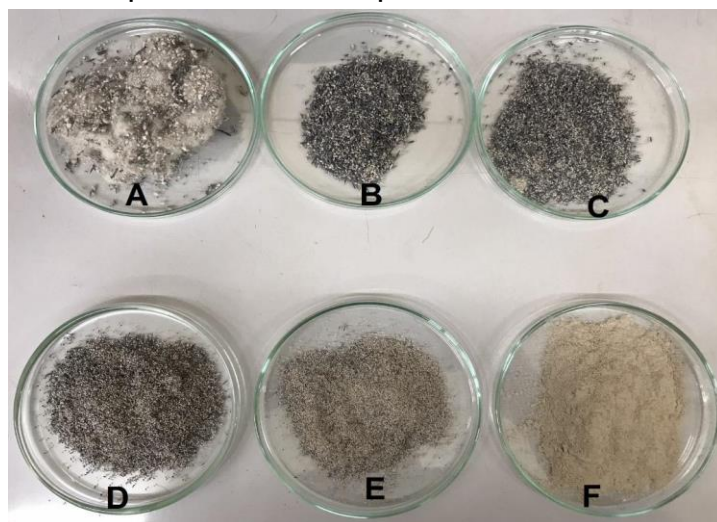
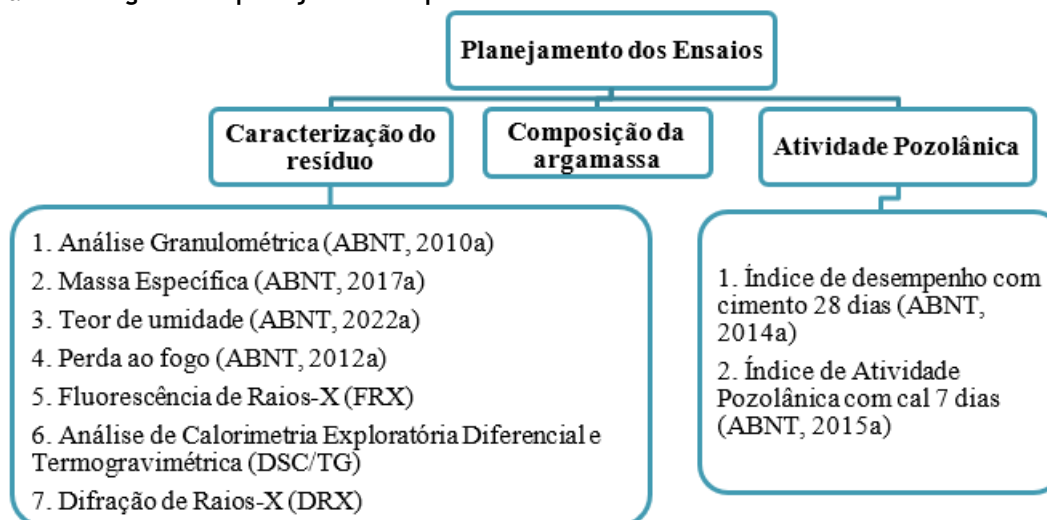


Tabela 1 - Propriedades físico-químicas do CP II-F-32

Propriedade	Valor
Massa específica aparente	0,9 a 1,2 g/cm ³ a 20 °C
Massa específica absoluta	Entre 2,8 e 3,2 g/cm ³ a 20 °C

Figura 4 - Fluxograma do planejamento experimental



Caracterização do Resíduo

Quanto à caracterização química, foram utilizadas técnicas de Fluorescência de Raios X (FRX) para determinar o teor de óxidos, perda ao fogo e teor de umidade. Em relação a caracterização física, foram realizadas análise granulométrica e massa específica. Para determinação da composição mineral realizou-se a Difração de Raios X (DRX) e na verificação da perda de massa da amostra em função da temperatura, a análise de Calorimetria Exploratória Diferencial e Termogravimétrica (DSC/TG). Os ensaios de FRX, DRX e DSC/TG foram realizados no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI) da Universidade Federal de Goiás (UFG). Os demais ensaios, perda ao fogo, teor de umidade, análise granulométrica e massa específica foram realizados no Laboratório de Química do IFG.

A NBR 12653 (ABNT, 2014b) orienta que seja feito o peneiramento úmido para definir o material passante na peneira #325, mas com objetivo de evitar demasiada geração de efluentes, primeiro fez-se o peneiramento a seco para conhecer o rendimento e a granulometria do resíduo. Para tal, foram utilizadas as peneiras de malha #60, #100, #200 e #325 e o equipamento Agitador Eletromagnético de Peneiras Bertel. Em seguida, utilizou-se duas amostras, de resíduo passante na peneira #100 (amostra 1) e de passante na peneira #200 (amostra 2) para o ensaio úmido, a fim de determinar a finura por meio da peneira 45 µm (#325) utilizando o método descrito na NBR 15894-3 (ABNT, 2010a).

Cada amostra foi transferida para um recipiente com 400 ml de água e 5 g de hexametáfosfato de sódio dissolvido, que foram agitadas até a dispersão total do material. Em seguida, com a torneira regulada com vazão de 5 L/min, cada amostra foi vertida na peneira #325 e colocada sob o fluxo da água por 10 minutos, de modo que água incidisse por toda a amostra. Após este processo, o material retido na peneira foi transferido para um cadinho e seco em estufa com temperatura de 105 °C até a massa constante.

A massa específica foi determinada segundo a NBR 16605 (ABNT, 2017a). Este ensaio é necessário para fazer a compensação de massa solicitada no ensaio de atividade pozolânica com cal da NBR 5751 (ABNT, 2015a). Para o ensaio utilizou-se duas amostras de 50 g passante na peneira #200. O solvente utilizado para preenchimento dos vazios dos interstícios e poros foi o querosene.

Para determinar o teor de umidade, três amostras de 1,0 g de material passante na peneira #200, foram levados à estufa por 1 hora com temperatura de 105 °C. Em seguida, os cadinhos foram para o dessecador para resfriar e depois foram pesados.

O ensaio de perda ao fogo foi realizado empregando o Método nº 1 da NBR 18 (ABNT NM, 2012a). Para este ensaio utilizou-se três amostras de 1,0 g de resíduo passante na peneira #200, previamente seca em estufa. Foi calcinada em forno mufla à temperatura de 950 °C por 50 minutos e depois resfriada em dessecador contendo sílica gel.

A Fluorescência de raios X é uma técnica que permite identificar e quantificar os elementos presentes em uma amostra expressos na forma de óxidos. Essa análise é fundamental para conhecer a composição química do resíduo e verificar se atende aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014b) para poder ser classificado como material pozolânico. Esta técnica foi realizada em um espectrômetro Rigaku modelo ZSX Primus IV, equipado

com tubo de Rh. A amostra do resíduo enviada para este ensaio estava in natura e passante na peneira #200. Para determinação da perda na ignição (LOI) a amostra foi previamente seca em estufa e depois calcinada a 1000 °C por 5 horas.

A Análise Termogravimétrica (TG) foi realizada para verificar a variação de massa do RCG em função da temperatura, enquanto a Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) serviu para identificar as transformações físico-químicas do resíduo também em função da temperatura. O resíduo in natura passante na peneira #200 foi aquecido entre o intervalo de temperatura: 30 - 1200 °C, em atmosfera de ar sintético utilizando o Equipamento Netzsch STA 449 F3 Nevio e taxa de aquecimento 10 K/m.

O ensaio de difração de raios X é uma técnica amplamente utilizada na caracterização de materiais, especialmente em amostras sólidas. Ele fornece informações valiosas sobre a estrutura cristalina dos materiais, permitindo a identificação das fases presentes na amostra, a determinação dos parâmetros de rede cristalina e a análise do arranjo atômico. As medidas de DRX foram realizadas em um difratômetro Bruker D8 Discover, utilizando-se radiação monocromática de um tubo com anodo de cobre acoplado a um monocromador Johansson para $K\alpha_1$ operando em 40kV e 40mA, configuração Bragg Brentano θ - 2θ .

Composição da argamassa

Nesta etapa foram testadas várias misturas de argamassa contendo o resíduo geopolimérico a fim de definir os teores de substituição do cimento pelo resíduo. Todos os corpos de provas foram produzidos com uma parte de cimento e três de areia padronizada, em massa, e com relação água/cimento de 0,48 (1:3:0,48). Esta proporção também foi seguida para as misturas de argamassa com o resíduo.

Esta quantidade de material foi definida pela NBR 7215 (ABNT, 2019a), que prescreve o método que deve ser utilizado para determinar a resistência à compressão do cimento Portland em corpos de prova cilíndricos. Além disso, esta norma foi empregada para orientar a elaboração da argamassa de referência, dos corpos de prova e sobre todos os procedimentos envolvidos até a data de ruptura dos corpos de provas.

Já a metodologia para preparação das argamassas com adição do resíduo foi baseada na NBR 5752 (ABNT, 2014a). Esta norma especifica o método para determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias. A referida norma propõe que a argamassa com adição de pozolana tenha em sua composição a substituição parcial do cimento por 25% em massa de material pozolânico, ou seja, o resíduo geopolimérico citado neste estudo.

Então, definiu-se a moldagem de 4 corpos de prova cilíndricos de 50x100 mm para cada dosagem x data de ruptura, sendo as idades de ruptura definidas em 7, 28 e 63 dias. E os teores de substituição parcial do cimento pelo resíduo geopolimérico proposto foi de 5%, 10%, 15% e 25%.

Outro parâmetro avaliado foi o índice de consistência das argamassas. De acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019a), para a argamassa de referência, o índice de consistência é considerado normal quando se apresenta no intervalo de 165 ± 5 mm. E segundo a NBR 5752 (ABNT, 2014a), a argamassa com resíduo deve apresentar índice de consistência entre os limites de ± 10 mm maior ou igual ao índice da argamassa de referência, se for menor deve ser adicionado aditivo superplastificante até atingir o índice determinado. A Figura 5 ilustra o ensaio de determinação do índice de consistência da argamassa.

Nas argamassas com 15 e 25% de resíduo foi adicionado o aditivo superplastificante, pois apresentou o índice de consistência menor que o índice da argamassa de referência. A Tabela 2 apresenta a composição das argamassas elaboradas.

Figura 5 - Ensaio de índice de consistência

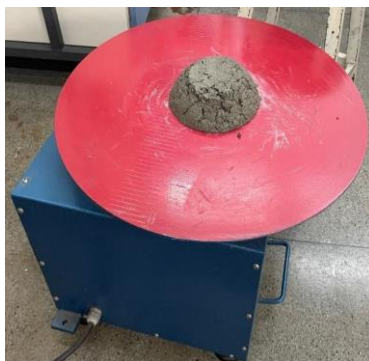


Tabela 2 - Composição das argamassas

Argamassa	Cimento (g)	Resíduo (g)	Areia fração 16 (g)	Areia fração 30 (g)	Areia fração 50 (g)	Areia fração 100 (g)	Água (g)	Aditivo (g)
Referência	624	-	468	468	468	468	300	-
05% RCG	592,80	31,20	468	468	468	468	300	-
10% RCG	561,60	62,40	468	468	468	468	300	-
15% RCG + Aditivo	530,40	93,60	468	468	468	468	300	3,10
25% RCG + Aditivo	468	156	468	468	468	468	300	4,00

Atividade Pozolânica

O ensaio para determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland (Icimento) aos 28 dias foi realizado em conformidade com a NBR 5752 (ABNT, 2014a). Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014b), para um material ser considerado pozolânico o Icimento aos 28 dias, calculado pela Equação 1, deve ser maior ou igual a 90%.

$$\text{Icimento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

Icimento é o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. O resultado, expresso em porcentagem (%), deve ser arredondado ao inteiro;

f_{cB} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento CP II-F-32 e 25% de material pozolânico (argamassa B), aproximada ao décimo e expressa em Megapascals (MPa); e

f_{cA} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento CP II-F-32 (argamassa A), aproximada ao décimo e expressa em Megapascals (MPa).

As argamassas foram produzidas para moldar os corpos de prova, conforme as composições definidas anteriormente. Após a moldagem, ainda nos moldes, permaneceram em câmara úmida por 24 horas com a face protegida com placas de vidro. A Figura 6 apresenta os corpos de prova nos moldes.

Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e imersos em bacias com água saturada de cal, onde permaneceram até a data de ruptura. A Figura 7 ilustra os corpos de prova imersos.

Após tempo de cura, nos tempos de 7, 28 e 63 dias, os corpos de prova foram levados para a ruptura à compressão no Laboratório de Construção Civil do SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial) da Vila Canaã, Goiânia - Go. Os corpos de prova foram rompidos na prensa hidráulica INTERMETRIC modelo iM Unique 223, utilizando Neoprene para nivelar as faces deles.

A fim de determinar a atividade pozolânica com cal aos 7 dias de materiais pozolânicos, desempenhou-se os procedimentos descritos pela NBR 5751 (ABNT, 2015a). A atividade pozolânica é obtida a partir da média da resistência à compressão de três corpos de prova cilíndricos. A NBR 12653 (ABNT, 2014b) determina que, para material ser considerado pozolânico, a argamassa com cal aos 7 dias deve apresentar resistência maior ou igual a 6 MPa.

Os corpos de prova são preparados a partir de uma argamassa composta de uma parte em massa de hidróxido de cálcio (104 g) e outra parte de material pozolânico que corresponda ao dobro do volume do hidróxido de cálcio, e 234 g de cada uma das 4 frações da areia. A quantidade em massa de resíduo é definida pela Equação 2.

$$m = 2 \cdot \frac{\delta_{poz}}{\delta_{cal}} \cdot 104 \text{ (g)} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

m é a massa do resíduo em gramas;

δ_{poz} é o valor da massa específica do material pozolânico; e

δ_{cal} é o valor da massa específica do hidróxido de cálcio.

Figura 6 - Corpos de prova nos moldes



Figura 7 - Corpos de prova imersos em água para cura



Para determinar a quantidade de água necessária para a mistura de argamassa com cal, realizou-se o ensaio de índice de consistência. A quantidade de água da mistura foi suficiente para obter o índice de consistência no intervalo de 220 e 230 mm, conforme o método prescrito pela NBR 7215 (ABNT, 2019a).

Os corpos de prova foram mantidos em uma câmara úmida durante as primeiras 24 horas. Após esse período, os corpos de prova ainda nos moldes foram transferidos para uma estufa com temperatura controlada de 55 ± 2 °C. Esse processo é chamado de cura aquecida e tem o objetivo de acelerar o processo de cura da argamassa. O aumento da temperatura ajuda a promover uma reação química mais rápida, levando a uma cura mais eficiente.

Os corpos de prova foram retirados da cura após 7 dias, e submetidos a um ensaio de compressão na prensa hidráulica INTERMETRIC modelo iM Unique 223. A prensa hidráulica foi calibrada e ajustada para garantir que a aplicação da carga fosse adequada e controlada. O neoprene foi colocado na superfície superior e inferior da prensa para proporcionar uma distribuição uniforme da força aplicada ao corpo de prova durante o ensaio.

Resultados e discussões

Por meio de peneiramento a seco foi possível identificar a granulometria do resíduo. A Tabela 3 apresenta o resultado do peneiramento a seco.

Observou-se que apenas 16% do material passou na peneira #325, no entanto a NBR 12653 (ABNT, 2014b) preconiza que o material passante na peneira #325 seja maior que 80%. Nesse momento decidiu-se por cominuir o material passante na peneira #200, em moinho de bolas, para melhorar o rendimento, no entanto, houve aglutinação das partículas, inviabilizando o peneiramento. Então, para definir a granulometria do resíduo que atende a norma, seguiu-se com o recomendado e realizou-se o peneiramento úmido conforme NBR 15894-3 (ABNT, 2010a).

Como resultado do peneiramento úmido, a amostra 1 (material passante na peneira #100) teve 42,25% de material retido na peneira #325, enquanto a amostra 2 (material passante na peneira #200) teve apenas 19% de material retido. Portanto, o material que foi peneirado a seco e passante na peneira #200 atende ao requisito

da norma, pois ao ser submetido ao peneiramento úmido com a peneira #325 ficou retido menos 20%. A Figura 8 mostra o resíduo passante na peneira #200.

Com este resultado, observou-se que 51,5% do resíduo ficou retido na peneira #200 e não poderá ser utilizado neste estudo como possível pozolana. Para melhorar este rendimento seria necessário a indústria aprimorar o processo de moagem e peneiramento, para promover maior finura dos grãos do resíduo, com intuito de ampliar o percentual de reaproveitamento do resíduo.

Foram feitos dois ensaios de massa específica e a diferença dos resultados não ultrapassou 0,02 g/cm³. O resultado do ensaio de massa específica foi 2,28 g/cm³, valor próximo ao reportado por Zhao (2020) de 2,68 g/cm³ para o estudo com pó de tijolo de argila. Também foi observado que material é menos denso que o cimento Portland utilizado no estudo, que apresenta massa específica entre 2,80 e 3,20 g/cm³, conforme dados fornecidos pelo fabricante.

O resultado do ensaio de teor de umidade do resíduo foi de 0,62% e atende aos parâmetros da NBR 12653 (ABNT, 2014b) que especifica que seja menor ou igual a 3%.

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014b), a perda ao fogo do material deve ser menor ou igual a 10%. Foram realizados três ensaios e obteve-se três resultados aproximados conforme Tabela 4, mas diferentes devido a heterogeneidade do material. A média de perda ao fogo foi de 17,12%, e isso se deve às raspas de pneu e fibras ainda presentes no material após o peneiramento.

Como resultado da FRX tem-se composição química do resíduo apresentada na Tabela 5. Os óxidos majoritários foram dióxido de silício (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃) devido ao aluminossilicato presente no resíduo, elementos que estão ligados diretamente com a atividade pozolânica.

A Tabela 6 apresenta de forma sucinta os resultados obtidos dos ensaios de caracterização físico-químicos e os requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014b) para cada propriedade. Segundo esta norma, o resíduo se classificaria na classe N que contempla pozolana natural ou artificial.

Tabela 3 - Resultado do peneiramento a seco do RCG

Peneira	MESH #	Abertura a malha (mm)	Peso retido (g)	Peso retido acum. (g)	% retida	% retida acum.	% passante acum.
1	60	0,250	5,29	5,29	8,9%	8,9%	91,1%
2	100	0,150	8,88	14,17	15,0%	23,9%	76,1%
3	200	0,075	16,34	30,51	27,6%	51,5%	48,5%
4	325	0,045	19,30	49,81	32,6%	84,0%	16,0%
Coletor			9,48	59,29	16,0%	100%	0,0%

Figura 8 - Material peneirado a seco e passante peneira #200

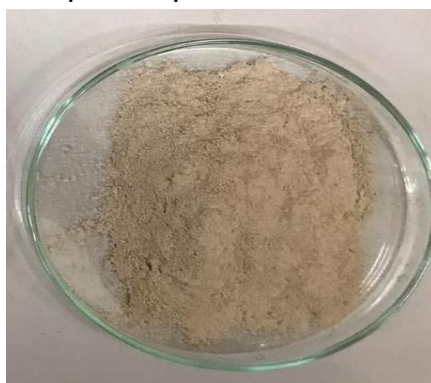


Tabela 4 - Resultado do ensaio de perda ao fogo

Amostra	PF %	Média	Desvio Padrão
1	15,72%	17,12%	0,02
2	18,73%		
3	16,84%		

Tabela 5 - Resultado da análise química

Óxidos analisados	(%m)
SiO_2	41,44
Al_2O_3	24,55
CaO	8,41
Na_2O	3,50
Fe_2O_3	3,09
K ₂ O	1,49
TiO_2	1,20
MgO	0,46
SO_3	0,20
P_2O_5	0,16

Tabela 6 - Requisitos e resultados para material pozolânico artificial

Propriedades	Requisito da norma para Classe N	Resultados dos ensaios
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	$\geq 70 \%$	69,08 %
SO_3	$\leq 4 \%$	0,20 %
Teor de umidade	$\leq 3 \%$	0,62%
Perda ao fogo	$\leq 10 \%$	17,12%
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5 \%$	3,50 %
Material retido na peneira 45 μm	$< 20 \%$	19,00 %

A análise por FRX fornece a composição dos óxidos maiores da amostra. Para a classificação do grau de pozolanidade do material, alguns óxidos possuem maiores importâncias. Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014b), o somatório dos óxidos: SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 deve ser superior a 70% a composição total do material, isso se deve a característica aglutinadora de tais elementos. Com a realização de apenas um ensaio de FRX foi possível observar que o somatório ficou com menos de 1% abaixo do valor exigido. Há necessidade de mais ensaios de FRX para verificar se a composição química do resíduo atende os 70% solicitado pela norma, pois este componente é importante para a ação pozolânica.

A NBR 12653 (ABNT, 2014b) exige que o teor de SO_3 seja igual ou inferior a 4%, e o resíduo apresentou apenas 0,20%. Valores elevados de SO_3 podem provocar corrosão das armaduras do concreto e expansão durante a hidratação das partículas do cimento, resultando em fissuras no concreto. Neste caso, o baixo teor de trióxido de enxofre (SO_3) ajuda a mitigar os problemas associados à ocorrência de fissuras e corrosão, contribuindo assim para a durabilidade e a qualidade do concreto em aplicações de construção.

O teor de álcalis do resíduo foi de 3,5% e está acima do determinado na NBR 12653 (ABNT, 2014b) que deve ser menor que 1,5%. Este resultado está relacionado à composição do resíduo geopolimérico que contém hidróxido de sódio como ativador alcalino.

Teores de álcalis excessivos em matrizes cimentícias podem reagir com componentes reativos da pozolana, como sílica amorfa, resultando na formação de gel álcali-sílica. De acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2018b), esse gel é formado na reação álcali-sílica (RAS) que ocorre entre hidróxidos alcalinos provenientes do cimento ou outras fontes de minerais silicosos, podendo causar expansão anormal e fissuração do concreto. Além disso, a presença excessiva de álcalis pode neutralizar os efeitos pozolânicos da pozolana, reduzindo sua capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio e, assim, diminuindo o desempenho geral do concreto.

Entretanto, Mehta e Monteiro (2008) afirmam que cimentos contendo menos de 0,6% de óxido de sódio equivalente e concretos com teor de álcalis abaixo 3 kg/m³ no concreto não sofrem expansão deletéria devido à reação álcali-agregado. Segundo os mesmos autores, material reativo abaixo de 75mm, apesar de reagir, não oferece expansão significativa.

Testes de reatividade alcalina feito por Davidovits (2005), pelo método de expansão de barra de argamassa, realizados em 1990, com cimento Portland e cimento geopolimérico não geram nenhuma reação nociva de álcali-agregado, mesmo com teores alcalinos de até 9,2%.

Estudos de Li *et al.* (2005) mostraram que argamassas de geopolímero com teores alcalinos de até 12,1% apresentaram taxas desprezíveis de expansão de 0,01% aos 14 dias e retração da expansão de 0,03% aos 90 dias, não gerando a reação álcali-sílica.

A análise DSC/TG apresentou regiões de perda de massa e mudanças de fase no termograma. A Figura 9, mostra o resultado da análise termogravimétrica em verde e de calorimetria exploratória diferencial em azul. Houve uma perda de massa de 17,45% após duas horas de aquecimento. A análise térmica é relevante para hipóteses em que se deseja calcinar o material.

No aquecimento entre a temperatura inicial e 200 °C ocorre a remoção da água livre, sendo um evento endotérmico e a perda de massa, visível no termograma. O pico endotérmico em 266,5 °C pode estar relacionado a decomposição de matéria orgânica, raspas de pneu e fibras, juntamente com a perda de massas respectiva ao evento.

Na temperatura de 482,5 °C ocorre um dos eventos mais importantes da calcinação de argilas, que é a desidroxilação, onde há evaporação da água quimicamente ligada aos minerais filossilicatos. A desidroxilação é marcada pela perda de massa e um evento endotérmico (Agra *et al.*, 2023).

Já o pico em 699,5 °C representa a descarbonatação das fases carbonáceas, como a calcita e a dolomita, este evento também inclui perda de massa e um pico endotérmico. Os eventos que ocorreram acima de 900 °C, com pouca ou nenhuma perda de massa, podem estar relacionados a combustão de matéria orgânica da raspa de pneu ainda presente e a recristalização do material argiloso, pico exotérmico, resultando na reorganização da metacaulinita em outra fase, o que pode diminuir a atividade pozolânica.

Pode-se observar na Figura 10 o difratograma da amostra natural passante na peneira #200 enviada para análise de Difração de Raios X. É possível observar a presença de materiais de baixa cristalinidade entre os ângulos 10° e 20°, onde há um halo sob os picos, que estão bem definidos neste range de 2 θ .

A quantificação mineralógica foi obtida pelo método de refinamento Rietveld, que se baseia no ajuste de uma composição teórica calculada ao difratograma experimental. A Tabela 7, apresenta os valores de cada fase cristalina encontrada no resíduo após o ensaio.

Utilizando do refinamento de Rietveld observa-se que nenhuma das fases majoritárias são ferrosas, sendo os principais minerais:

- caulinita, que é um mineral de silicato de alumínio hidratado;
- albita que é um silicato de alumínio e sódio;
- quartzo, que é o óxido de silício; e
- calcita, que é um carbonato de cálcio.

Figura 9 - Resultado da Análise DSC/TG

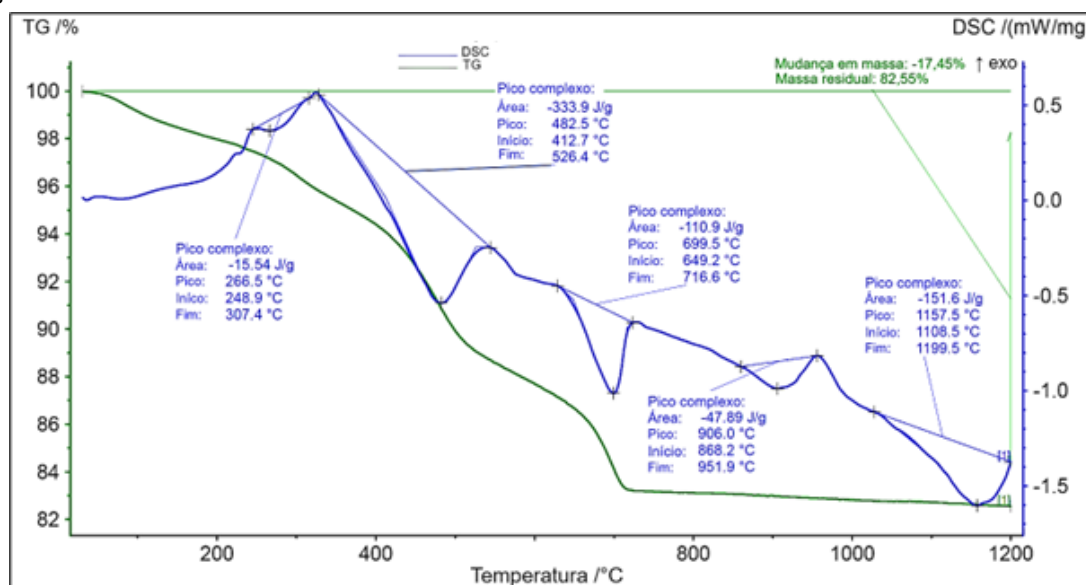


Figura 10 - Difratoformas da amostra natural

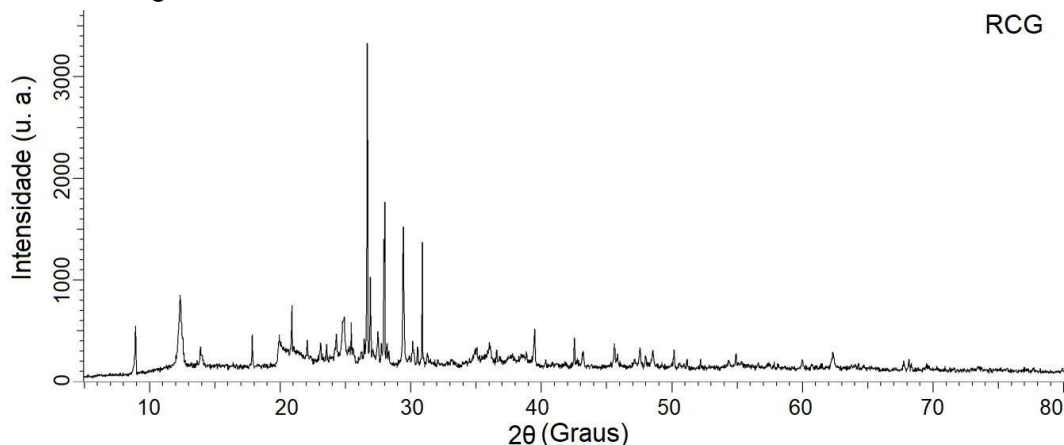


Tabela 7 - Proporção modal das fases minerais cristalinas pelo método de Rietveld da amostra

Mineral	Massa (%)
Caulinita	41,15
Albita	12,77
Quartzo	11,59
Calcita	8,30
Ilita	6,34
Ortoclásio	5,67
Egirina	4,19
Dolomita	4,00
Muscovita	3,42
Rutilo	1,26
Hematita	0,74
Celadonita	0,62

A caulinita é um mineral comumente encontrado em argilas e indica que o material pode se transformar em pozolana após calcinação, devido à transformação da caulinita em material amorfo (Mohammed, 2017). Ainda segundo o autor, durante o processo de calcinação, a caulinita perde água de hidratação e sua estrutura cristalina, transformando-se em metacaulinita, que é um material amorfo e altamente reativo. A metacaulinita possui uma elevada quantidade de sílica e alumina em uma forma amorfa, tornando-a altamente reativa quando em contato com a água e o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento Portland.

A Tabela 8 apresenta os resultados referentes à determinação de resistência à compressão das argamassas ensaiadas aos 7, 28 e 63 dias. Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018a), a resistência à compressão com CP II-F-32 aos 7 dias deve ser ≥ 20 MPa e aos 28 dias ≥ 32 MPa, logo o ensaio da argamassa de referência ficou dentro dos padrões. Além disso, a NBR 7215 (ABNT, 2019a) prescreve que o desvio relativo máximo de quatro valores de tensão não pode exceder 6% e pode-se observar que isto não aconteceu neste ensaio.

Ao avaliar os resultados, pode-se observar que a argamassa com 5% de adição de resíduo obteve o melhor desempenho em todas as idades ensaiadas, além de ter atingido a resistência esperada para os 28 dias de 32 MPa, continuou aumentando sua resistência aos 63 dias. Segundo Mehta e Monteiro (1994) os cimentos com pozolana são mais lentos no desenvolvimento da resistência. Isso pode ser observado na Tabela 8, pois ao longo do tempo as argamassas com a adição do resíduo aumentam sua resistência, assim como ocorre com a adição mineral de pozolanas.

Embora as pozolanas contribuam para o ganho de resistência ao longo do tempo, os ensaios de resistência à compressão em 28 dias foram estabelecidos como um padrão na indústria de construção para avaliar a qualidade e o desempenho do concreto, o que torna os resultados comparáveis e consistentes.

A partir dos valores de resistência à compressão média de cada traço e idade, calculou-se o índice de desempenho com cimento Portland. Em seguida, esses índices foram comparados com o requisito NBR 12653 (ABNT, 2014b) de 90% aos 28 dias. A Figura 11 mostra o resultado do índice de desempenho de cada traço de argamassa com substituição parcial do cimento Portland e o requisito na idade de 28 dias.

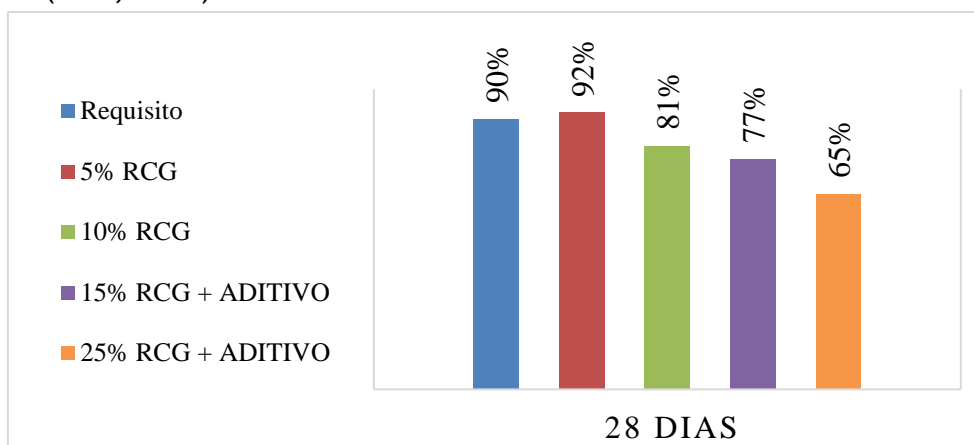
Os resultados mostram que as argamassas com substituição parcial do cimento por 5% de resíduo geopolimérico ultrapassou o requisito de 90% determinado pela norma. No entanto, a NBR 12653 (ABNT, 2014b) exige que a argamassa formulada com 25% de substituição atinja um índice maior ou igual a 90%, mas neste ensaio só atingiu 65%. Ademais, as outras argamassas com adição do resíduo não alcançaram o índice de desempenho requerido pela norma.

A NBR 12653 (ABNT, 2014b) estabeleceu que o ensaio de resistência à compressão das argamassas produzidas com Ca(OH)_2 P.A., após 7 dias de cura, deve atingir resistência maior que 6 MPa para ser classificado como pozolânico. Para verificar este quesito foram realizados dois ensaios.

Tabela 8 - Resistência à compressão com cimento Portland

Argamassa	7 Dias			28 Dias			63 Dias		
	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Relativo Máximo	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Relativo Máximo	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Relativo Máximo
Referência	28,50	29,23	2,48%	36,40	34,83	-4,52%	40,30	40,40	0,25%
	29,30		-0,26%	33,30		4,38%	41,10		-1,73%
	29,40		-0,60%	34,10		2,08%	40,40		0,00%
	29,70		-1,63%	35,50		-1,94%	39,80		1,49%
05% de RCG	24,70	26,20	5,73%	31,90	32,13	0,70%	35,10	35,13	0,07%
	27,50		-4,96%	32,80		-2,10%	34,70		1,21%
	26,40		-0,76%	31,60		1,63%	36,70		-4,48%
	26,20		0,00%	32,20		-0,23%	34,00		3,20%
10% de RCG	23,40	24,00	2,50%	28,00	28,23	0,80%	33,90	34,25	1,02%
	24,70		-2,92%	29,90		-5,93%	33,60		1,90%
	23,50		2,08%	27,20		3,63%	34,90		-1,90%
	24,40		-1,67%	27,80		1,51%	34,60		-1,02%
15% de RCG + aditivo	23,10	23,30	0,86%	27,60	26,70	-3,37%	30,70	30,40	-0,99%
	22,80		2,15%	25,80		3,37%	29,30		3,62%
	23,20		0,43%	26,90		-0,75%	30,00		1,32%
	24,10		-3,43%	26,50		0,75%	31,60		-3,95%
25% de RCG + aditivo	18,60	18,78	0,93%	23,50	22,68	-3,64%	25,60	25,38	-0,89%
	18,70		0,40%	21,90		3,42%	25,60		-0,89%
	19,50		-3,86%	22,60		0,33%	25,20		0,69%
	18,30		2,53%	22,70		-0,11%	25,10		1,08%

Figura 11 - Gráfico do índice de desempenho de cada argamassa e o requisito de 90% aos 28 dias da NBR 12653 (ABNT, 2014b)



No primeiro ensaio, ao adicionar 250 g de água o índice de consistência foi de 228 mm, dentro da faixa recomendada pela NBR 5751 (ABNT, 2015a), e o resultado da resistência à compressão dos corpos de prova foi de 3,23 MPa. Isso pode indicar que a quantidade de água adicionada foi excessiva, resultando em uma mistura muito úmida e possivelmente enfraquecendo a resistência da argamassa. Isto se deve ao fato da NBR 5751 (ABNT, 2015a) apresentar um índice de consistência pré-determinado, que deve ser obtido por um volume de água variável, o que interfere na porosidade da argamassa e influência na sua resistência à compressão.

No segundo ensaio, ao adicionar uma quantidade menor de água (240 g) obteve-se um índice de consistência de 216 mm, e a resistência à compressão aumentou para 5,6 MPa. A redução da quantidade de água resultou em uma mistura mais seca, o que pode ter melhorado a resistência da argamassa.

Com base nos dois ensaios percebe-se que o emprego de água extra, para tornar a argamassa com cal, mais trabalhável e atingir o índice de consistência preconizado em norma, prejudicou suas propriedades mecânicas fazendo com que a resistência à compressão não atingisse o requisito de 6 MPa. O resíduo é composto de um material muito fino (argila), por isso, segundo Recena (2012), acaba por exigir uma quantidade elevada de água para atingir a trabalhabilidade requerida, comprometendo a resistência mecânica.

Após avaliação dos dois ensaios realizados das argamassas com cal os resultados dos corpos de prova não atingiram o requisito de resistência à compressão de 6 MPa. Uma solução, que poderia estar definida em norma, é o uso do aditivo superplastificante, assim como a NBR 5752 (ABNT, 2014a) sugere a adição de um aditivo superplastificante para manter o índice de consistência solicitada em norma, mas esta opção não é empregada na NBR 5751 (ABNT, 2015a).

Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar os resíduos de compósitos geopoliméricos gerados por uma indústria goiana e avaliar seu uso como adição mineral com efeito pozolânico na composição da argamassa em substituição parcial ao cimento. Foram testadas taxas de substituição de 5%, 10%, 15% e 25% em massa do cimento.

Quanto à caracterização físico-química, os resultados obtidos nos ensaios foram comparados com os requisitos da norma NBR 12653 (ABNT, 2014b). Os seguintes resultados estão dentro dos parâmetros da norma para ser classificado como uma pozolana classe N: o teor de SO_3 , o teor de umidade e a quantidade de material retido na peneira 45 μm . Entretanto, o somatório dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 foi menor que o requisito, já a perda ao fogo e o teor de álcalis do resíduo obtiveram valores altos contrariando o determinado pela norma.

Com relação ao índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, a argamassa com 5% de adição de resíduo, em substituição ao cimento, obteve 92% de desempenho e, portanto, atende ao requisito da norma. O último requisito é a atividade pozolânica com cal aos sete dias, o resultado não alcançou a resistência de 6 MPa pré-determinada na norma.

Portanto, conclui-se que o resíduo de compósito geopolimérico não pode ser utilizado como material pozolânico, pois os limites de norma para sua classificação não foram atingidos em sua maioria. No entanto, uma alternativa relevante para o aproveitamento deste resíduo é utilizá-lo como enchimento em compósitos cimentícios, pois a substituição de 5% do cimento Portland por resíduo, não apresentou perda de resistência.

Esta é, portanto, uma opção significativa para aproveitar os resíduos desta indústria e desempenhar um papel eficaz na diminuição dos impactos ambientais decorrentes do descarte desses materiais, ao introduzir um novo produto comercial no setor de construção, além de contribuir para a redução de demanda do cimento.

Referências

AGRA, T. M. S. *et al.* Characterizing and processing a kaolinite-rich water treatment sludge for use as high-reactivity pozzolan in cement manufacturing. **Applied Clay Science**, v. 236, p. 106870, may, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: materiais Pozolânicos: especificação. Rio de Janeiro, 2014b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-1**: Agregados: Reatividade alcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2018b.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-3**: metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta: parte 3: determinação da finura por meio da peneira 45 µm. Rio de Janeiro, 2010a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17051**: materiais pozolânicos: determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2022a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: materiais Pozolânicos: determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias. Rio de Janeiro, 2015a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: materiais Pozolânicos: determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: areia normal para ensaio de cimento: Especificação. Rio de Janeiro, 2015b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: cimento Portland: determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: cimento Portland: análise química: determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012a.
- BACARJI, E. *et al.* Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 1–10, ago. 2013.
- DAVIDOVITS, J. Geopolymer chemistry and sustainable development, In: DAVIDOVITS, J. (ed.). **Geopolymer: green chemistry and sustainable development solutions**. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2005.
- DE AZEVEDO, A. R. G. *et al.* Economic potential comparative of reusing different industrial solid wastes in cementitious composites: a case study in Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, v. 24, n. 4, p. 5938–5961, jul. 2021.
- HOSSAIN, M. M. *et al.* Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: a review. **Construction and Building Materials**, v. 116, p. 128–140, jul. 2016.
- LI, K. L. *et al.* Early mechanical property and durability of geopolymer. In: DAVIDOVITS, J. (ed.). **Geopolymer: green chemistry and sustainable development solutions**. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2005.
- LEHNE, J.; PRESTON, F. **Chatham house report making concrete change innovation in low-carbon cement and concrete #concretechange**. Disponível em: <https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/2018-06-13-making-concrete-change-cement-lehne-preston-final.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2023.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.
- MOHAMMED, S. Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: a review. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 10-19, jun. 2017.
- RECENA, F. A. P. **Conhecendo argamassa**. 2. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2012.
- SINGH, N. B.; MIDDENDORF, B. Geopolymers as an alternative to Portland cement: an overview. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 950–618, mar. 2020.
- TAILBY, J.; MACKENZIE, K. J. D. Structure and mechanical properties of aluminosilicate geopolymer composites with Portland cement and its constituent minerals. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 5, p. 787–794, maio 2010.
- ZHAO, Y. *et al.* The particle-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, p. 118521, jan. 2020.

Agradecimentos

Ao IFG pelo apoio financeiro com a Bolsa Piq-Aluno. À empresa goiana que nos forneceu o resíduo para a pesquisa e outros materiais necessários. Ao SENAI pela disposição do laboratório para execução dos ensaios. Ao Laboratório KBF, ao CRTI e a AQUALIT pela realização de análises de caracterização do material.

Andressa Carvalho Rezende Herrero

Conceitualização. Análise de dados. Pesquisa. Metodologia. Redação manuscrito original. Redação - revisão e edição.

Departamento Pós-Graduação | Instituto Federal de Goiás | Rua 75, 46, Centro | Goiânia - GO - Brasil | CEP 74055-110 | Tel.: (62) 3227-2811 | E-mail: engcivil.andressa@gmail.com

Sergio Botelho de Oliveira

Análise de dados. Disponibilização de ferramentas. Supervisão. Validação de dados e experimentos. Redação - revisão e edição.

Departamento Áreas Acadêmicas II, Coordenação de Química | Instituto Federal de Goiás | Rua 75, 46, Centro | Goiânia - GO - Brasil | CEP 74055-110 | Telefone 62 3227-2700 | E-mail: sergio.oliveira@ifg.edu.br

Editores: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros e Eduardo Pereira**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.