

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIA, GESTÃO E SUSTENTABILIDADE

ANDRESSA CARVALHO REZENDE

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

Goiânia, 2023.

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- ☐ Tese ☐ Artigo Científico
☒ Dissertação ☐ Capítulo de Livro
☐ Monografia – Especialização ☐ Livro
☐ TCC - Graduação ☐ Trabalho Apresentado em Evento
☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____

Nome Completo do Autor: Andressa Carvalho Rezende

Matrícula: 20212011280250

Título do Trabalho: Valorização de resíduos de uma indústria de pré-moldados de compósitos geopoliméricos como adição pozolânica

Autorização - Marque uma das opções

1. (x) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 18/10/2023.



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIA, GESTÃO E SUSTENTABILIDADE

ANDRESSA CARVALHO REZENDE

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

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Tecnologia,
Gestão e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Goiás - Dissertação de Mestrado
Profissional. Área de Concentração: Interdisciplinar III.
Linha de Pesquisa: Gerenciamento de Resíduos.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira

Goiânia, 2023.

R467v Rezende, Andressa Carvalho.

Valorização de resíduos de uma indústria de pré-moldados de compósitos geopoliméricos como adição pozolânica / Andressa Carvalho Rezende. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2023.
61 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado Profissional em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Construção civil - indústria de pré-moldados - compósitos geopoliméricos . 2. Indústria de pré-moldados - Goiás (Estado). 3. ABNT NBR 12653:2014 - materiais pozolânicos - requisitos . I. Oliveira, Sérgio Botelho de (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. III. Título.

CDD 691.5



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

PARECER 4/2023 - GYN-CMTGS/GYN-GPPEX/CP-GOIANIA/IFG

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA, GESTÃO E SUSTENTABILIDADE**

ANDRESSA CARVALHO REZENDE

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE UMA INDÚSTRIA DE PRÉ-MOLDADOS DE COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS COMO ADIÇÃO POZOLÂNICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa.

Linha de Pesquisa: Modelagem de Sistemas.

Aprovada em: 28/09/2023

Banca examinadora:

Orientador e Presidente: Prof. Dr. SÉRGIO BOTELHO DE OLIVEIRA – PPGTGS IFG;

Avaliador Interno: Prof. Dr. WESLEY PACHECO CALIXTO – PPGTGS IFG;

Avaliador Externo: Prof. Dr. GUILHERME BOTELHO MEIRELES DE SOUZA – UFG;

Avaliador Externo: Prof. Dr. DANNS PEREIRA BARBOSA – PUC GO.

Documento assinado eletronicamente por:

- Wesley Pacheco Calixto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 10/11/2023 10:55:53.
- Dannes Pereira Barbosa, Dannes Pereira Barbosa - Docente - Puc / Goiás (01587609000171), em 07/11/2023 14:58:30.
- Guilherme Botelho Meireles de Souza, Guilherme Botelho Meireles de Souza - Docente - Ufg (01567601000143), em 07/11/2023 12:20:26.
- Sergio Botelho de Oliveira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 07/11/2023 11:10:12.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 25/09/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 457704

Código de Autenticação: 4fd6647857



Dedicatória

Dedico este trabalho ao marido Luiz Gustavo e a minha mãe Vanessa, que me apoiaram durante toda a caminhada.

Agradecimentos

A Deus, pela saúde e proteção.

Agradeço ao meu marido Luiz Gustavo e a minha mãe Vanessa, por estarem ao meu lado nessa jornada, apoiando e auxiliando.

Ao Prof. Dr. Sérgio Botelho, pela confiança e orientação deste trabalho.

Ao IFG pelo apoio financeiro com a Bolsa Piq-Aluno.

Ao laboratório de Construção Civil do IFG, nas pessoas de Sérgio Azevedo e Alfredo, pelo apoio na realização prática, pelos ensinamentos e contribuições valiosos a este trabalho.

Ao Cesar Augusto por disponibilizar o laboratório do SENAI para execução dos experimentos.

Ao Laboratório KBF, ao CRTI e a AQUALIT pela realização de análise de caracterização do material.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para realização e conclusão deste trabalho.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein,
1879-1955.

Resumo

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

Autor: Andressa Carvalho Rezende

Orientador: Dr. Sérgio Botelho de Oliveira

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 foi levado para laboratório do Instituto Federal de Goiás - Campus Goiânia, onde foram realizadas análises físico-químicas para verificar se o resíduo atende aos parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 12653:2014 Materiais Pozolânicos – Requisitos. O resíduo apresentou potencial para ser utilizado como pozolana, pois na análise granulométrica apenas 19% ficaram retido 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. Já o desempenho com cal não obteve o resultado desejado, pois ao adicionar mais água na argamassa para obter o índice de consistência, 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

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

Author: Andressa Carvalho Rezende

Advisor: Dr. Sérgio Botelho de Oliveira

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, carried out in the industry itself. It was then taken to the laboratory of the Federal Institute of Goiás - Campus Goiânia, where physical-chemical analyzes were carried out to verify if the residue meets the parameters established by ABNT NBR 12653: 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, due to the fact that 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. The performance with lime did not obtain the desired result, as when adding more water to the mortar to obtain the consistency index, the resistance decreased. After analysis, it was realized that the residue does not qualify as pozzolan but can be used as a filler.

Keywords

mineral addition; kaolinite; reuse of waste.

Lista de Figuras

Figura 1 – Esquema dos benefícios da utilização de resíduo como adição mineral.....	26
Figura 2 – Fluxograma do planejamento experimental.	30
Figura 3 – Produtos da indústria: (a) pergolados, móveis e (b) edificação.	35
Figura 4 – Matriz extrusora.	36
Figura 5 – Perfil pré-moldados.....	36
Figura 6 – Blocos de vedação com 6 furos.....	37
Figura 7 – Fluxograma do processo de fabricação dos perfis pré-moldados.	38
Figura 8 – Resíduos da indústria: (a) Aparas dos perfis e (b) peças deformadas.....	38
Figura 9 – Agitador de peneiras.	39
Figura 10 – Material peneirado a seco e passante peneira #200.	41
Figura 11 – Frasco de Le Chatelier com RCG e solvente.	41
Figura 12 – Resultado da Análise DSC/TG.....	46
Figura 13 – Difratoograma da amostra natural.....	47
Figura 14 –Difratoograma da amostra com o refinamento Rietveld.	47
Figura 15 – Ensaio de índice de consistência.....	50
Figura 16 – Corpos de prova nos moldes.	51
Figura 17 – Corpos de prova imersos em água para cura.....	51
Figura 18 – Prensa hidráulica do SENAI.	52
Figura 19 – Gráfico do índice de desempenho de cada argamassa e o requisito de 90% aos 28 dias da NBR 12653:2014.	53

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas do CP II-F-32.....	28
Tabela 2 – Resultados de requisitos físicos e químicos conforme ABNT NBR 7214:2015.....	29
Tabela 3 – Resultados da granulometria conforme ABNT NBR 7214:2015.	29
Tabela 4 – Resultado do peneiramento seco do RCG.....	40
Tabela 5 – Resultado ensaio de umidade.....	42
Tabela 6 – Resultado ensaio de perda ao fogo.....	42
Tabela 7 – Resultado da análise química.....	43
Tabela 8 – Requisitos e resultados para material pozolânico artificial.....	44
Tabela 9 – Determinação da proporção modal das fases minerais cristalinas pelo método de Rietveld da amostra.....	48
Tabela 10 – Composição das argamassas.....	50
Tabela 11 – Resistência à compressão com cimento Portland.....	52

Lista de abreviaturas e siglas

A/C	Relação água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CP II-F	Cimento Portland composto com fíler calcário
DRX	Difração de Raios X
DSC	Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial
FRX	Fluorescência de Raios X
IFG	Instituto Federal de Goiás
IPT	Instituto de Pesquisa Tecnológicas
ISSO	Organização Internacional de Normalização
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NM	Norma Mercosul
RCD	Resíduos de Construção Civil e Demolição
RCG	Resíduo de compósito geopolimérico
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
TG	Termogravimétrica

Lista de símbolos

Mesh (Malha de peneiras)

Sumário

1 Introdução	16
1.1 Justificativa.....	18
1.2 Objetivos	18
2 Revisão bibliográfica	20
2.1 Resíduos na construção civil	20
2.2 Geopolímeros	21
2.3 Cimento Portland.....	22
2.4 Adições minerais	24
2.5 Argamassas.....	27
3 Materiais e métodos.....	28
3.1 Materiais.....	28
3.1.1 Resíduo de compósito geopolimérico (RCG).....	28
3.1.2 Cimento Portland.....	28
3.1.3 Hidróxido de Cálcio P.A.....	28
3.1.4 Aditivo químico	28
3.1.5 Agregado miúdo	29
3.2 Planejamento dos experimentos	30
3.3 Métodos de caracterização do resíduo	30
3.3.1 Análise granulométrica	31
3.3.2 Massa específica	31
3.3.3 Teor de umidade	31
3.3.4 Perda ao fogo (PF)	31
3.3.5 Fluorescência de raios X (FRX).....	32
3.3.6 Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial e Termogravimétrica (DSC/TG).....	32
3.3.7 Difração de Raios X (DRX).....	32
3.4 Métodos de avaliação da atividade pozolânica	32
3.4.1 Atividade Pozolânica com cimento Portland.....	33
3.4.2 Atividade Pozolânica com Cal	33
4 Resultados e discussão.....	35
4.1 Caracterização do resíduo	35

4.1.1	Análise granulométrica	39
4.1.2	Massa específica	41
4.1.3	Teor de umidade	42
4.1.4	Perda ao fogo (PF)	42
4.1.5	Fluorescência de raios X (FRX).....	43
4.1.6	Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial e Termogravimétrica (DSC/TG).....	45
4.1.7	Difração de Raios X (DRX).....	46
4.2	Avaliação da atividade pozolânica	48
4.2.1	Definição da composição da argamassa.....	49
4.2.2	Atividade Pozolânica com cimento Portland.....	50
4.2.3	Atividade Pozolânica com Cal	54
4.3	Discussões	55
5	Conclusão	57
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	58
	Referências	59

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 reciclagem, reutilização e destinação final. Sendo assim, um sistema de gerenciamento de resíduos sólidos, efluentes e emissões atmosféricas, se torna uma condição para se manter competitivo no mercado.

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, correspondendo a cerca de 8% das emissões globais de dióxido de carbono (Lehne *et al.*, 2018).

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, como a redução das emissões de CO₂ e a preservação de recursos naturais. O desafio reside em manter o desempenho do composto cimentício no mesmo nível, enquanto ao mesmo tempo minimiza o impacto ambiental e maximiza o uso de resíduos.

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 necessária para a 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 principal objetivo de encontrar alternativas para minimizar problemas ambientais e econômicos causadas 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 cimentício. 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 o grande desafio de dar destinação aos resíduos não biodegradáveis gerados no processo de fabricação dos seus artefatos. A empresa utiliza uma matéria-prima patenteada à base de geopolímero relativamente nova para esta finalidade, e, por este motivo, ainda não foi encontrada destinação adequada para os resíduos gerados.

Esta indústria busca obter a certificação internacional pela ABNT NBR ISO 14001 para demonstrar o seu comprometimento com práticas sustentáveis e responsabilidade ambiental. Esta norma estabelece os requisitos para implementação do sistema de gestão ambiental (SGA), com objetivo principal de ajudar as empresas a gerenciar seus impactos ambientais e promover a sustentabilidade em suas operações. Para obter este selo verde a empresa necessita atender a certos critérios, um deles é a gestão de rejeitos, incluindo a reutilização, recuperação e reciclagem.

O descarte inadequado de resíduos industriais pode causar poluição do solo, da água e do ar, além de representar uma ameaça à fauna e flora local. Ao reutilizar esses resíduos na produção de novos produtos, evita-se o acúmulo em aterros e a liberação de substâncias tóxicas no meio ambiente. Além disso, a reciclagem dos resíduos pode ser uma opção economicamente viável para as indústrias, pois pode reduzir os custos de descarte e aquisição de novas matérias-

primas.

Ao encontrar formas inovadoras de reciclar e reutilizar os resíduos industriais, os pesquisadores estão contribuindo para um futuro mais sustentável, em que os impactos negativos da produção industrial no meio ambiente podem ser minimizados. O estudo e a adoção de práticas sustentáveis no âmbito industrial são fundamentais para alcançar uma harmonia entre o desenvolvimento econômico e a proteção do meio ambiente.

Nesse sentido, o presente estudo busca uma forma sustentável de aproveitamento do resíduo de compósito geopolimérico e agregar valor ao mesmo ao destiná-lo para uma aplicação útil em vez de ser descartado. A alternativa proposta é a adição deste resíduo cominuído em substituição parcial ao cimento Portland para fabricação de argamassa. Testes físico-químicos e de resistência mecânica foram realizados para examinar o desempenho do compósito cimentício contendo este material. Por fim, foi analisado se o compósito residual poderia ser reaproveitado ao atuar como adição mineral com efeito pozolânico, uma solução sustentável, para então elaborar o detalhamento técnico descritivo de viabilização de uso deste produto.

1.1 Justificativa

Estudos experimentais envolvendo o uso de resíduos industriais como pó de granito, pó de tijolo, cinzas, dentre outros, como substitutos ao cimento na produção de argamassa estão disponíveis na literatura. No entanto não há estudo com este resíduo de compósito geopolimérico advindo desta matéria-prima patenteada. Dito isso, espera-se com este trabalho, uma contribuição relevante para a indústria de pré-moldados geopoliméricos, que visa obter selo verde para uma produção mais limpa e indiretamente para a indústria de construção civil que terá economia de matéria-prima com a utilização deste resíduo na produção de argamassa e redução na emissão de dióxido de carbono devido a redução do uso de cimento Portland.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo caracterizar os resíduos gerados na indústria de pré-moldados geopoliméricos e aplicá-los como adição mineral com efeito pozolânico na fabricação de argamassas em substituição parcial ao cimento Portland, promovendo a sua reciclagem. Para alcançar este objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram adotados:

- Conhecer o processo de fabricação industrial de pré-moldados geopoliméricos;
- Caracterizar físico-química e mineralogicamente o resíduo gerado;
- Desenvolver ensaios mecânicos com os corpos de prova obtidos da argamassa de referência e da argamassa com adição do resíduo;
- Avaliar o uso desse resíduo como adição mineral com efeito pozolânico na composição da argamassa, de acordo com as normas da ABNT.

Revisão bibliográfica

Neste capítulo serão abordados os diversos aspectos da literatura relativos ao assunto da pesquisa. Não se almeja esgotar os temas apresentados, mas sim abordar tópicos semelhantes e significativos que deram suporte conceitual ao trabalho.

2.1 Resíduos na construção civil

A indústria da construção civil é uma das atividades responsáveis pelo desenvolvimento econômico e social, mas por outro lado é grande geradora de resíduos. Com a acelerada urbanização, a geração de resíduos de construção civil e demolição (RCD) alcançou índices alarmantes, produto de reformas, demolições e desperdícios de obras de construções (Brasileiro; Matos, 2015).

Em 2020, no Brasil, foram coletadas aproximadamente 47 milhões de toneladas de RCD. Dentre as regiões brasileiras, a região centro-oeste ocupou a quarta posição entre as mais geradoras de resíduos dessa natureza, sendo responsável por 11,22% desse total coletado (Abrelpe, 2021).

Para lidar com essa crescente quantidade de resíduos e reduzir os impactos ambientais, uma solução é o uso do RCD reciclado. Ao conhecer as propriedades e características dos materiais provenientes da reciclagem dos resíduos, é possível utilizá-los como matéria-prima para novas construções, evitando que sejam dispostos em aterros sanitários. Isso contribui para a preservação das fontes naturais de materiais utilizados na construção civil.

A reciclagem dos RCD também pode trazer benefícios econômicos e sociais. A utilização de materiais reciclados pode representar uma opção mais acessível para a construção civil, especialmente em projetos de menor custo. Além disso, a indústria de reciclagem pode gerar empregos e contribuir para a economia local.

Em resumo, a reciclagem dos RCD é uma medida importante para reduzir os impactos ambientais da indústria da construção, ao mesmo tempo em que oferece oportunidades econômicas e sociais. O uso responsável dos materiais reciclados pode contribuir para o

desenvolvimento de um setor mais sustentável e consciente de sua responsabilidade ambiental.

2.2 Geopolímeros

O termo geopolímero foi criado e aplicado pelo químico francês Joseph Davidovits na década de 1970 (Pacheco-Torgal, et al., 2015). Embora não seja o único pesquisador no campo dos geopolímeros, Davidovits é amplamente reconhecido como o pai da tecnologia de geopolímeros e foi um pioneiro na pesquisa e desenvolvimento desses materiais.

Desde então, os geopolímeros têm sido objeto de extensa pesquisa e desenvolvimento em todo o mundo devido às suas propriedades especiais e potencial sustentável em comparação com os materiais de construção tradicionais.

Os geopolímeros são materiais inorgânicos de origem sintética que possuem propriedades semelhantes às dos materiais de construção tradicionais, como cimento e concreto, mas são produzidos por uma reação química diferente. Em vez de depender da produção de clínquer, como na fabricação de cimento, os geopolímeros usam uma mistura de materiais alcalinos e fontes ricas em silício e alumínio, como cinzas volantes, escória, argila e outras, para formar uma estrutura tridimensional estável.

De acordo com Davidovits (2005) os geopolímeros são considerados polímeros devido ao fato de se transformar, policondensar e endurecer rapidamente a baixa temperatura, além disso, o prefixo “geo” se refere ao fato de serem inorgânicos, duros, estáveis até temperatura de 1250°C e não inflamáveis.

A formação dos geopolímeros se deve a um processo exotérmico denominado geopolimerização, que envolve a dissolução de matérias-primas contendo aluminato e silicato em soluções alcalinas líquidas concentradas e reações de policondensação (Singh; Middendorf, 2020).

Segundo Pacheco-Torgal et al. (2015), qualquer material inorgânico constituído por sílica e alumina podem servir como matéria-prima para os geopolímeros, em especial aqueles materiais que tenham sido sujeitos a um tratamento térmico, tornando o mais reativo. Desta forma, os geopolímeros podem ser produzidos a partir de resíduos de várias atividades industriais, tornando-os materiais ambientalmente corretos.

Os geopolímeros têm diversas aplicações em várias indústrias devido às suas propriedades únicas e vantagens em termos de resistência, durabilidade e sustentabilidade. Segundo Davidovits (2020 apud Gratao, 2021), a ampla variedade de aplicações inclui

“materiais resistentes ao fogo, isolamento térmico, materiais de construção de baixa tecnologia, telhas cerâmicas de baixa energia, itens refratários, cimentos e concretos, compósitos para reparo e fortalecimento de infraestruturas, artes e decoração e arqueologia.”

É importante destacar que a área de geopolímeros continua evoluindo, e novas aplicações para esses materiais continuam sendo pesquisadas e desenvolvidas. Sua versatilidade e benefícios sustentáveis os tornam uma opção atraente na busca por alternativas mais ecológicas e com melhores propriedades para diversas aplicações industriais.

2.3 Cimento Portland

De acordo com Neville (2016), o nome “cimento Portland” deriva da semelhança em cor e qualidade do cimento endurecido com a pedra de Portland, um calcário extraído na Ilha de Portland em Dorset, Inglaterra. O cimento Portland é um aglomerante hidráulico pois além de endurecer através de reações de hidratação, também forma um produto resistente a água. Isso acontece devido a reação de hidratação do cimento, ou seja, a reação química do cimento com a água gera produtos com características de pega e endurecimento (Mehta e Monteiro, 1994).

O processo de fabricação do cimento consiste basicamente na extração da matéria-prima (argila e calcário), em seguida, britagem, homogeneização e calcinação em forno rotativo com temperatura de aproximadamente 1450°C até a formação do clínquer. Após produção do clínquer, para compor o cimento, é adicionado outros materiais, como gesso, calcário ou pozolana, e então essa mistura passa por moagem até atingir a granulometria ideal, menor de 75 µm, em seguida é armazenado.

Existem vários tipos de cimento Portland, cada um projetado para aplicações específicas, como construção em geral, concreto de alta resistência, concreto de baixo calor de hidratação para estruturas maciças, concreto resistente a sulfato e muito mais. O tipo e as proporções das matérias-primas utilizadas durante a produção, bem como o processo de moagem, determinam as propriedades do cimento.

Mehta e Monteiro (1994) afirmam que é importante conhecer as substâncias formadas quando o cimento reage, pois ele sozinho não aglomera os agregados e só adquire essa propriedade adesiva quando misturado com água. O conhecimento das substâncias formadas durante a hidratação do cimento é essencial para entender como ele adquire suas propriedades adesivas e de resistência mecânica. A hidratação é um processo químico complexo em que

compostos de cimento, como o silicato de cálcio e o aluminato de cálcio, reagem com a água para formar produtos de hidratação, incluindo silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio (CH), e etringita, entre outros.

Esses produtos de hidratação são responsáveis por "colar" os agregados, como areia e brita, para formar uma massa coesa conhecida como concreto ou argamassa. Além disso, essas reações químicas liberam calor, conhecido como calor de hidratação, que pode ser vantajoso em algumas situações, como em climas frios ou quando se deseja acelerar o endurecimento. No entanto, em certos casos, o calor de hidratação excessivo pode levar a rachaduras térmicas e outros problemas na estrutura.

A velocidade de reação durante a hidratação também é um fator importante, que pode ser favorável ou desfavorável dependendo das aplicações. Uma hidratação muito rápida pode levar ao chamado "pico de calor" e a um rápido endurecimento, sendo útil em situações em que a estrutura de concreto precisa atingir rapidamente uma resistência, como construções de emergência ou em áreas de alto risco.

Já em climas quentes, um "pico de calor" excessivo, prejudica a qualidade do concreto e pode causar fissuras. Por outro lado, uma hidratação muito lenta pode prolongar o tempo de pega, sendo ideal para concretos pré-fabricados, pois mantêm-no utilizável durante o transporte e aplicação.

O tempo de pega e o endurecimento do cimento são duas fases importantes que ocorrem após a mistura do cimento com água. Essas etapas estão relacionadas com o processo de hidratação do cimento, que é a reação química entre o cimento e a água, resultando na formação de produtos de hidratação que dão origem ao endurecimento do material. Segundo Neville (2016), em resumo, pega refere-se à transição do estado fluido para um estado rígido e endurecimento refere-se ao aumento de resistência de uma pasta de cimento após a pega.

O tempo de pega é definido como o período entre o momento em que o cimento é misturado com água e o instante em que a pasta de cimento começa a endurecer e adquirir resistência. O início de pega é o momento em que a pasta de cimento começa a ficar mais rígida e perde a fluidez inicial. Nesse estágio, a mistura ainda está moldável e pode ser trabalhada, mas começa a ganhar consistência. Esse período é importante para a aplicação do cimento em processos de construção. O fim de pega ocorre quando a pasta de cimento atinge uma rigidez significativa, tornando-se praticamente inalterável. Nesse ponto, a mistura não pode mais ser moldada ou manipulada, e o processo de endurecimento continua.

O endurecimento do cimento é a fase em que a pasta de cimento se torna cada vez mais sólida e ganha resistência mecânica. Essa etapa é uma continuação da hidratação do cimento,

em que os produtos de hidratação continuam a se formar e desenvolver a estrutura cristalina do cimento. O endurecimento é um processo contínuo que pode levar semanas ou mesmo meses para que o cimento alcance sua resistência máxima.

Os tempos de pega e endurecimento podem variar dependendo do tipo de cimento utilizado, das condições ambientais e da quantidade de água adicionada durante a mistura. Por isso, é essencial seguir as especificações do fabricante e as boas práticas de mistura e aplicação para obter um concreto ou argamassa com desempenho adequado.

Ao cimento Portland podem ser adicionados diversos materiais, conhecidos como adições minerais e aditivos, com o objetivo de melhorar certas propriedades ou características do concreto ou argamassa produzidos. Alguns dos aditivos adicionados mais comuns são os:

- Aceleradores ou retardadores: usados para ajustar a velocidade de pega do cimento, permitindo maior controle sobre o tempo de endurecimento;
- Plastificante ou superplastificante: também conhecidos como redutores de água, esses aditivos melhoram a trabalhabilidade do concreto, reduzindo a quantidade de água necessária para uma consistência adequada;
- Aditivo incorporador de ar: melhoram a resistência ao congelamento e descongelamento do concreto, promovendo a formação de pequenas bolhas de ar que permitem a expansão do gel de água sem danificar a estrutura do concreto;
- Impermeabilizante: esses aditivos reduzem a permeabilidade do concreto, tornando-o mais resistente à penetração de água e íons prejudiciais, como os de cloreto, que podem causar a corrosão das armaduras internas.

2.4 Adições minerais

As adições minerais são materiais silicosos finamente moídos, capazes de substituir parcialmente o cimento Portland. O uso dessas adições, geralmente está associado a melhoria do desempenho de compostos cimentícios (argamassa e concreto), pois promovem redução de custos com cimento e aumento da trabalhabilidade e resistência (Metha e Monteiro, 1994).

As adições minerais podem ser classificadas em três categorias principais com base em suas propriedades e interações com o cimento Portland ou outros materiais cimentícios: pozolânicas, cimentantes e inertes. Essa classificação é importante porque cada tipo de adição mineral oferece benefícios e contribuições distintas às propriedades do material cimentício.

A pozolana é um material composto por sílica ativa em forma reativa, e pode ser de

origem natural ou resultar de processos industriais. Segundo Neville (2016), embora a pozolana em si tenha pouca ou nenhuma atividade cimentícia, quando é misturada com água e entra em contato com o hidróxido de cálcio (um subproduto da hidratação do cimento Portland), ocorre uma reação química conhecida como reação pozolânica. Essa reação forma novos compostos gelificados, como os silicatos de cálcio, que possuem propriedades cimentícias.

Recena (2012) ressalta que não ocorrerá a reação pozolânica de forma significativa se na mistura do compósito cimentício com adição houver pouco cimento Portland, devido a carência de hidróxido de cálcio disponível, logo a adição não irá contribuir para a resistência mecânica do compósito.

Adições minerais cimentantes são materiais que possuem propriedades hidráulicas semelhantes ao cimento Portland, o que significa que eles podem reagir com a água e formar compostos cimentícios adicionais, além dos formados pelo cimento. As escórias de alto-forno são o exemplo mais comum de adições cimentantes.

Já as adições minerais inertes, não possuem atividade pozolânica ou cimentante significativa. Eles são adicionados para melhorar características específicas do concreto ou da argamassa, como a trabalhabilidade, a coesão e o preenchimento dos vazios. Fíler calcário e fíler silicoso são exemplos de adições inertes.

A NBR 12653 (ABNT, 2014) classifica as pozolanas em três classes:

- classe N – pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos químicos e físicos dispostos na própria norma;
- classe C – cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas que obedecem aos requisitos da norma;
- classe E – pozolanas não contempladas na classe N nem na classe C, mas que também obedecem aos requisitos específicos da norma.

A pozolanas naturais podem ser encontradas em regiões vulcânicas ou em áreas com depósitos de materiais silicosos e aluminosos. As pozolanas artificiais são aquelas que podem requerer um processo de tratamento ou modificação para torná-los reativos e adequados para serem utilizados como adição mineral.

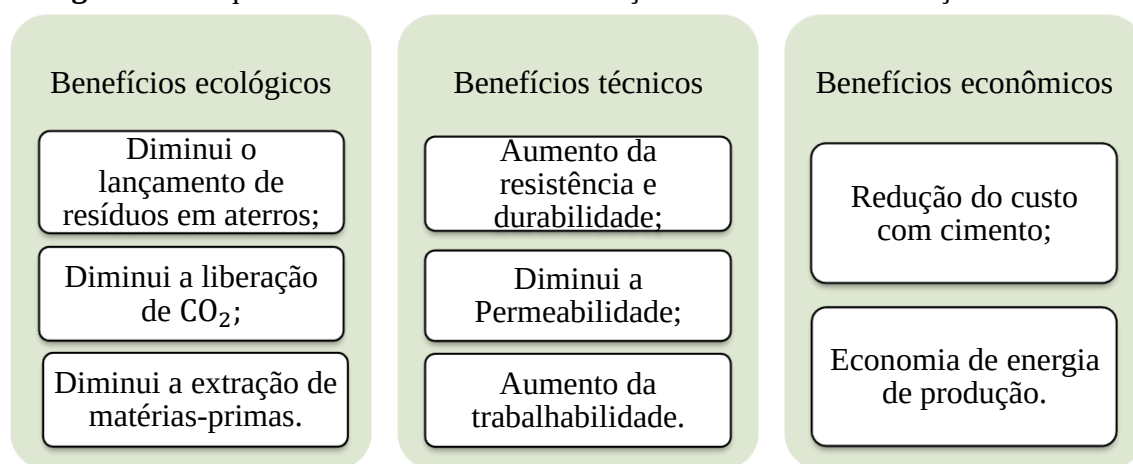
A utilização de resíduos industriais como adições minerais, especialmente como pozolanas, tem se tornado uma prática cada vez mais comum na indústria da construção civil, com o objetivo de tornar o setor mais sustentável e reduzir o impacto ambiental.

Existem diversos tipos de resíduos industriais que podem ser considerados pozolânicos, desde subprodutos de processos de produção até materiais descartados por outras indústrias. Alguns exemplos comuns de resíduos industriais utilizados como pozolanas incluem: cinzas

volantes, resíduos provenientes da queima de carvão mineral em usinas termelétricas; escórias de alto-forno, subprodutos da produção de ferro e aço a partir do minério de ferro; cinzas de casca de arroz e de bagaço de cana-de-açúcar, resultantes da queima em caldeiras industriais e usinas de açúcar e álcool.

A utilização de resíduos industriais como pozolanas traz benefícios ecológicos, técnicos e econômicos. A Figura 1 apresenta o detalhamento de cada benefício da utilização de resíduos industriais como adição mineral.

Figura 1 – Esquema dos benefícios da utilização de resíduo como adição mineral.



Fonte: Autoria própria, 2023.

O uso de resíduos como adições minerais podem trazer diversos benefícios, mas também apresentam desafios. Segundo Brasileiro e Matos (2015), um grande empecilho para reutilização de resíduos é cultural, pois há desconfiança por parte dos clientes e construtores quanto a qualidade dos produtos gerados. Além disso, outros pontos precisam ser considerados:

- a caracterização adequada dos resíduos é essencial para determinar seu potencial como adição mineral, sendo necessário entender sua composição química, granulometria e comportamento reativo;
- a necessidade de cumprir regulamentações e normas relacionadas ao uso de resíduos em materiais de construção;
- o transporte, manuseio e armazenamento de resíduos podem ser desafiadores e exigir infraestrutura especializada;
- a determinação do custo-benefício da utilização de resíduos como adições minerais, levando em consideração fatores como economia de matérias-primas e benefícios ambientais, pode ser complexa.

2.5 Argamassas

Segundo a NBR 13529 (ABNT, 2013), a argamassa é uma mistura homogênea de partes proporcionalmente determinadas de agregado miúdo, aglomerante inorgânico e água, que possui propriedades de aderência e endurecimento, e pode conter aditivo ou adição para melhorar essas propriedades.

Segundo Recena (2012), as argamassas devem ser consideradas como elemento de um sistema e não isoladamente como um material, devido a relevância de sua interação com o substrato e com o ambiente. Na indústria da construção civil, as argamassas são utilizadas para diversas aplicações, tais como assentamento de alvenaria, chapisco, reboco, assentamento de cerâmicas e porcelanatos, rejuntamento, regularização de piso e muitas outras finalidades.

Para bom desempenho de suas funções, as argamassas devem apresentar propriedades essenciais como trabalhabilidade, aderência ao substrato, capacidade de absorver deformações, resistência mecânica frente a solicitações, capacidade de retenção de água e durabilidade compatível com a vida útil da edificação.

Recena (2012) ressalta que uma argamassa de cimento e areia bem dosada pode ter suas características melhoradas pela incorporação de produtos alternativos, ou seja, aqueles diferentes de cimento Portland, cal, areia, aditivos e adições, contribuindo para a produção de uma argamassa de menor custo. No entanto, se estes materiais alternativos exigirem maior consumo de água, então a qualidade será prejudicada.

Materiais e métodos

3.1 Materiais

3.1.1 Resíduo de compósito geopolimérico (RCG)

O resíduo de compósito geopolimérico utilizado neste estudo é derivado de uma indústria goiana de fibrocerâmica, que enviou dois sacos de 50 KG para realização dos ensaios.

3.1.2 Cimento Portland

O cimento utilizado foi o Cimento Portland Composto com adição de fíler e resistência à compressão de 32MPa aos 28 dias (CP II-F-32), da marca Tocantins Votorantim. A sua caracterização físico-química foi fornecida pelo fabricante e está descrita na Tabela 1.

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

Fonte: Adaptado do fabricante, 2022.

3.1.3 Hidróxido de Cálcio P.A

Para realizar o ensaio de Atividade Pozolânica com cal aos 7 dias foi empregado o Ca(OH)_2 P.A. com teor mínimo 95% da marca Nox Solutions.

3.1.4 Aditivo químico

O aditivo superplastificante utilizado foi o Sika® ViscoCrete®-6500. Ele consiste em

uma solução de policarboxilato em meio aquoso, de cor marrom e densidade 1,08 +/- 0,02 kg/l. Sua dosagem recomendada é de 0,2% a 1,50% sobre o peso do aglomerante. Este aditivo tem a função de melhorar a trabalhabilidade da argamassa e reduzir a quantidade de água da mistura.

3.1.5 Agregado miúdo

Inicialmente, durante os primeiros experimentos deste estudo, optou-se por utilizar areia convencional com granulometria grossa, média e fina proveniente dos municípios goianos Sanclerlândia e São Luiz de Montes Belos. Para a confecção das argamassas, areia passava por secagem na estufa e era peneirada para separar as frações. No entanto, após os ensaios de Índice de Consistência da argamassa de referência, o resultado foi de 135 mm o que não atendeu o requisito da NBR 7214:2015, pois o valor normal está no intervalo de 160 e 170 mm. Então decidiu-se por utilizar a areia padronizada fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

Esta areia é normatizada conforme especificação da NBR 7214:2015, que descreve os requisitos necessários para a areia destinada à execução do ensaio de determinação da resistência à compressão do cimento Portland. Dito isto, as Tabelas 2 e 3 apresentam a caracterização dos dois lotes 37/2022 e 01/2023 dos pacotes de areia adquiridos no IPT, sendo um pacote de cada fração de granulometria.

Tabela 2 – Caracterização físico-química conforme ABNT NBR 7214:2015.

Determinação	Requisito	Lote 37/2022	Lote 01/2023
		Resultados	Resultados
Teor de sílica	$\geq 95\%$, em massa	96,4	97,4
Umidade	$\leq 0,2\%$, em massa	0,0	0,0
Matéria orgânica	≤ 100 ppm	< 100 ppm	< 100 ppm
Granulometria	Tabela 3		

Fonte: Adaptado do fabricante, 2023.

Tabela 3 – Caracterização granulométrica conforme ABNT NBR 7214:2015.

Fração	Material retido entre as peneiras de abertura nominal	Porcentagem em massa %		
		Requisito	Lote 37/2022	Lote 01/2023
			Resultados	Resultados
16	2,4 mm e 2,0 mm	≤ 10	1	1
	2,0 mm e 1,2 mm	≥ 90	98	97
30	1,2 mm e 0,6 mm	≥ 95	98	99

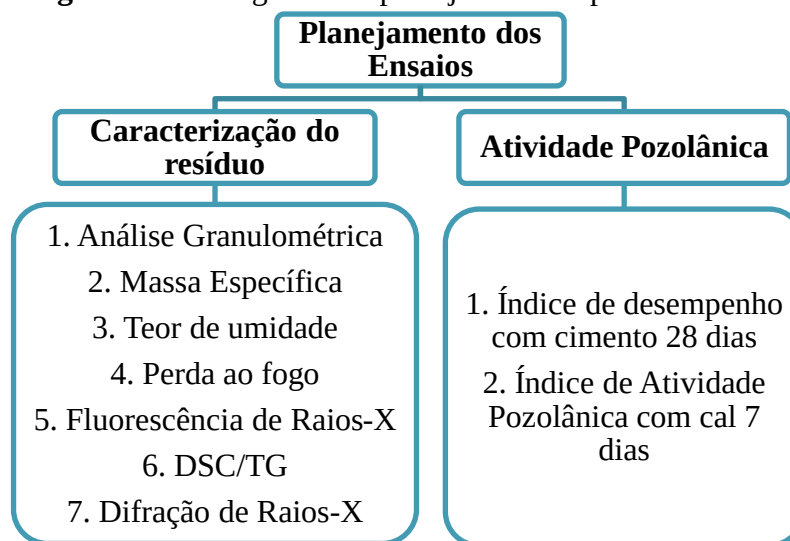
50	0,6 mm e 0,3 mm	≥ 95	96	99
100	0,3 mm e 0,15 mm	≥ 95	97	96

Fonte: Adaptado do fabricante, 2023.

3.2 Planejamento dos experimentos

Os ensaios foram realizados conforme normas da ABNT, principalmente a NBR 12653:2014 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 2 apresenta o fluxograma de planejamento geral dos experimentos.

Figura 2 – Fluxograma do planejamento experimental.



Fonte: Autoria própria, 2022.

3.3 Métodos de caracterização do resíduo

Para a caracterização físico-química do resíduo geopolimérico utilizou-se como referência os requisitos estabelecidos pela NBR 12653:2014. Quanto a 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 para verificar a perda de massa da amostra em função da temperatura a análise de Calorimetria Exploratória Diferencial e Termogravimétrica (DSC/TG). Este último ensaio, e os ensaios de FRX e DRX foram realizados no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI) da Universidade Federal de Goiás (UFG), enquanto os demais foram realizados no Laboratório de Química do IFG.

3.3.1 Análise granulométrica

Primeiramente, para conhecer a granulometria do material recebido em laboratório, foi realizado a análise granulométrica a partir do peneiramento a seco no Agitador Eletromagnético de Peneiras Bertel. Após realizar os ensaios a seco, o material foi submetido a um ensaio úmido para determinação da sua finura por meio da peneira 45 μm (#325), solicitado pela NBR 12653:2014. O método utilizado para tal é descrito na NBR 15894-3:2010 Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 3: determinação da finura. Aparelhos utilizados: balança, peneira com abertura de malha de 45 μm , estufa, torneira.

3.3.2 Massa específica

Determinação da massa específica com material passante na peneira #200, segundo os métodos da NBR 16605:2017 Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Este ensaio é necessário para fazer a compensação de massa solicitada no ensaio de atividade pozolânica com cal da NBR 5751:2015. Aparelhos utilizados: Frasco volumétrico de Le Chatelier, balança, recipiente, funis, termômetro, banho termostático.

3.3.3 Teor de umidade

Para determinar o teor de umidade utilizou-se a NBR 17051:2022 Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade, conforme prescreve a NBR 12653:2014. Aparelhos utilizados: balança, cadinho de porcelana, estufa e dessecador.

3.3.4 Perda ao fogo (PF)

Os ensaios de perda ao fogo foram realizados utilizando como referência o Método nº 1 da NBR NM 18:2012 Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Aparelhos utilizados: balança, cadinho de porcelana, Forno Mufla EDG3P-S 1800 e dessecador.

3.3.5 Fluorescência de raios X (FRX)

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 12653:2014 para poder ser classificado como material pozolânico.

3.3.6 Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial e Termogravimétrica (DSC/TG)

A análise de TG foi realizada para verificar a variação de massa da amostra em função da temperatura, enquanto a DSC foi para identificar as transformações físico-químicas do resíduo também em função da temperatura.

3.3.7 Difração de Raios X (DRX)

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.

3.4 Métodos de avaliação da atividade pozolânica

De acordo com a NBR 12653:2014, a determinação da atividade pozolânica de um material deve ser feita conforme as normas NBR 5752:2014 Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias e NBR 5751:2015 Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Estas normas fundamentam-se em medir a resistência mecânica de argamassas de cimento Portland

e cal, respectivamente, a partir da incorporação de materiais pozolânicos.

3.4.1 Atividade Pozolânica com cimento Portland

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 5752:2014. Segundo a NBR 12653:2014, para um material ser considerado pozolânico o Icimento aos 28 dias, calculado pela Equação 1, deve ser maior ou igual a 90%.

$$I_{cimento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

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

fcB 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);

fcA 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).

3.4.2 Atividade Pozolânica com Cal

Para determinar a atividade pozolânica com cal aos 7 dias de materiais pozolânicos a NBR 5751:2015 descreve os procedimentos. A atividade pozolânica é obtida a partir da média da resistência à compressão de três corpos de prova cilíndricos. A NBR 12653:2014 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.

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

Onde:

m é a massa do resíduo em gramas;

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

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

Resultados e discussão

4.1 Caracterização do resíduo

O resíduo de compósito geopolimérico é derivado de uma indústria goiana de fibrocerâmica, que produz perfis pré-moldados, através da extrusão, para criação de móveis, pergolados e construção de edificações em até quatro pavimentos. A Figura 3 apresenta os produtos desta indústria.

Figura 3 – Produtos da indústria: (a) pergolados, móveis e (b) edificação.



Fonte: Autoria própria, 2021.

O processo de extrusão é o que define a geometria do perfil pré-moldado geopolimérico. Nesse processo, a matéria-prima é direcionada à extrusora, conforme Figura 4, onde é compactada e forçada por um pistão ou eixo helicoidal, passando pela matriz formando o perfil.

Figura 4 – Matriz extrusora.

Fonte: Autoria própria, 2021.

O resultado da extrusão é uma coluna, com seção transversal específica e dimensões definidas, conforme Figura 5. 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).

Figura 5 – Perfil pré-moldados.

Fonte: Autoria própria, 2021.

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. A Figura 6 ilustra mostra um palete com blocos de vedação.

Figura 6 – Blocos de vedação com 6 furos.

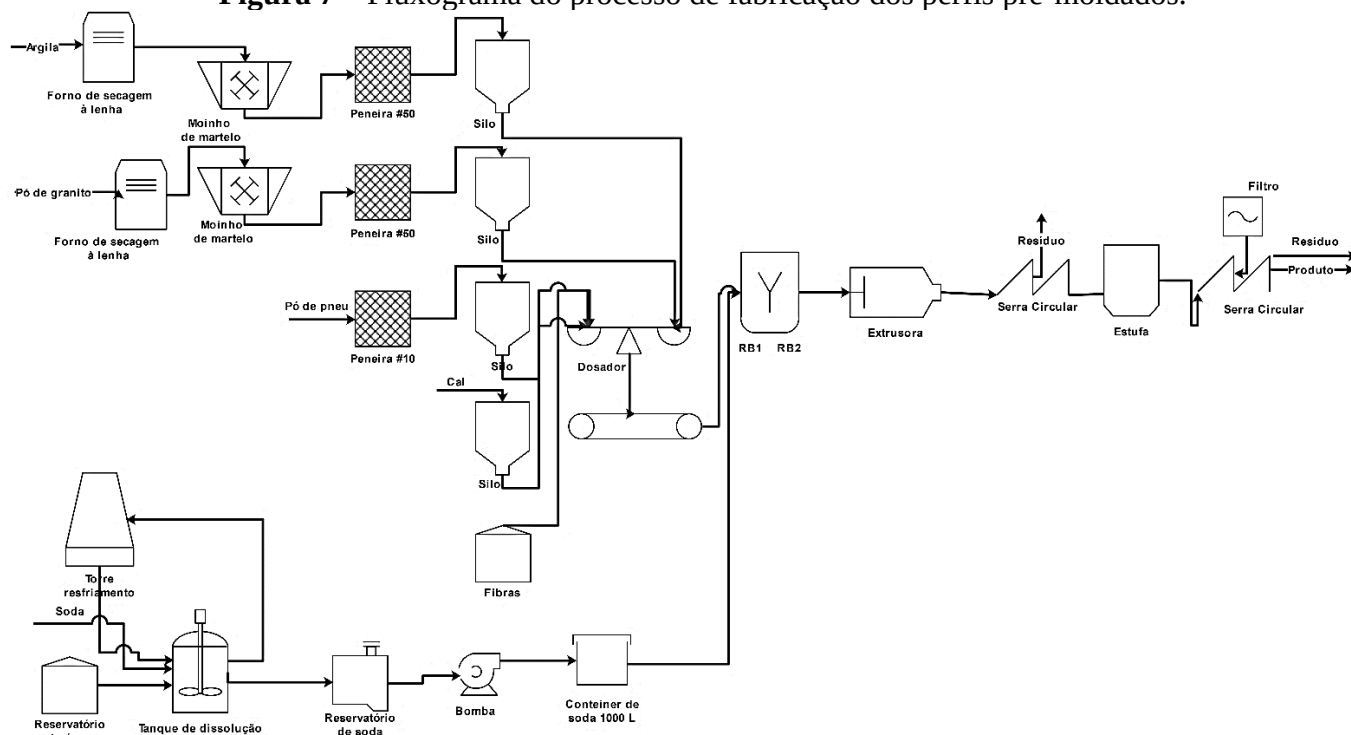
Fonte: Autoria própria, 2021.

O processo de fabricação da indústria é composto por várias etapas, no primeiro momento é feito o preparo das matérias primas. O aluminossilicato e o pó de granito, separadamente, passam por um forno para secagem e posteriormente vão para o moinho martelo para ser finamente moídos, depois passam na peneira #50 e são armazenados em silos. O pó de pneu é finamente moído, passa pela peneira #10 e é armazenado em um silo.

O hidróxido de cálcio e as fibras de polipropileno são adquiridas prontas para uso e armazenadas em silos. Já o hidróxido de sódio, também conhecido como soda cáustica, é recebido na indústria no formato de escamas, que são posteriormente dissolvidas em um tanque com água e armazenado em contêineres de plástico.

Em seguida os materiais secos são despejados dos silos em uma esteira com balança onde são dosados e vão para um agitador onde são homogeneizados e depois misturados com o hidróxido de sódio. A massa resultante do processo de homogeneização é encaminhada para uma extrusora para que seja moldado os perfis em um processo a vácuo. Na saída da extrusora, uma serra circular corta os perfis de acordo as dimensões pré-definidas.

A seguir, os perfis são colocados em formas metálicas e vão para a estufa para secagem por um período de 3 dias. Após este processo, segue para resfriamento em temperatura ambiente de forma gradual. Por fim, passam para o acabamento fino com corte das pontas (aparas) e lixamento. A Figura 7 apresenta o fluxograma do processo de fabricação dos perfis.

Figura 7 – Fluxograma do processo de fabricação dos perfis pré-moldados.

Fonte: Autoria própria, 2021.

Durante este 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 8.

Figura 8 – Resíduos da indústria: (a) Aparas dos perfis e (b) peças deformadas.

(a)

(b)

Fonte: Autoria própria, 2021.

Estes subprodutos industriais apresentam diversos tamanhos e para 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 nesta peneira foi coletado e armazenado em sacos de 50 kg.

4.1.1 Análise granulométrica

A NBR 12653:2014 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. O resíduo recebido após trituração na indústria foi peneirado a seco nas peneiras de malha #60, #100, #200 e #325 utilizando equipamento Agitador Eletromagnético de Peneiras Bertel, conforme Figura 9.

Figura 9 – Agitador de peneiras.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Segundo o manual do agitador, para análise de materiais mais finos com granulometria abaixo da peneira #48 a amostra deve ter de 10 a 60 gramas. No agitador empregou-se o reostato com intensidade de vibração 5 por 10 minutos. A Tabela 4 apresenta o resultado do peneiramento do material.

Tabela 4 – Resultado do peneiramento seco do RCG.

Peneira	MESH #	Abertura 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%

Fonte: Autoria própria, 2022.

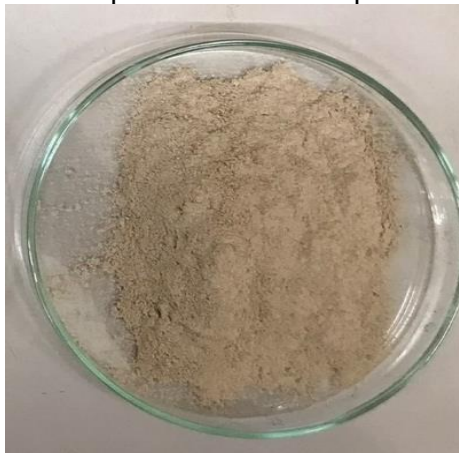
Observou-se que apenas 16% do material passou na peneira #325, no entanto a NBR 12653:2014 preconiza que o material passante na peneira #325 seja maior que 80%. Nesse momento decidiu-se por cominuir o material passante na peneira #200, em moinho de bolas, para melhorar o rendimento, no entanto, houve 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 15894-3:2010.

Para o peneiramento a úmido utilizou-se duas amostras, 20g de material passante na peneira #100 (amostra 1) e 20g passante na peneira #200 (amostra 2). Cada amostra foi transferida para um recipiente com 400 ml de água e 5 g de hexametáfosfato de sódio dissolvido, que foram agitadas até 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 todo 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 massa constante.

A amostra 1 teve 42,25% de material retido na peneira #325, enquanto a amostra 2 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 10 mostra o resíduo passante na peneira #200.

Figura 10 – Material peneirado a seco e passante peneira #200.



Fonte: Autoria própria, 2022.

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.

4.1.2 Massa específica

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. A Figura 11 apresenta o Frasco de Le Chatelier com solvente e resíduo após o banho termorregulador.

Figura 11 – Frasco de Le Chatelier com RCG e solvente.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Foram feitos dois ensaios com as amostras, e a diferença dos resultados não ultrapassou 0,02 g/cm³ conforme a NBR 16605:2017 preconiza. O resultado do ensaio de massa específica foi 2,28 g/cm³, valor próximo ao reportado por Zhao (2020) de 2,68 g/cm³. Nota-se que é um material menos denso que o cimento Portland utilizado no estudo, que apresenta a massa específica entre 2,80 e 3,20 g/cm³.

4.1.3 Teor de umidade

Para determinar o teor de umidade, três amostras de 1,0 g de material passante na peneira #200, foram levados a estufa por 1 hora com temperatura de 105°C. Em seguida, os cadinhos foram para o dessecador para resfriar e depois foram pesados. A Tabela 5 apresenta os resultados encontrados para três amostras. A umidade média foi de 0,62% e atende aos parâmetros da NBR 12653:2014 que é de menos de 3%.

Tabela 5 – Resultado ensaio de umidade.

Amostra	Umidade %	Média	Desvio Padrão
1	0,71%	0,62%	<0,01
2	0,58%		
3	0,57%		

Fonte: Autoria própria, 2023.

4.1.4 Perda ao fogo (PF)

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.

Tabela 6 – 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%		

Fonte: Autoria própria, 2023.

Conforme apresentado na Tabela 6, com os três ensaios das amostras coletadas, obteve-se três resultados aproximados, mas diferentes devido a heterogeneidade do material. A média

de perda ao fogo foi de 17,12%, e de acordo com a NBR 12653:2014, a perda ao fogo do material deve ser menor ou igual a 10%. Isso se deve as raspas de pneu e fibras ainda presentes no material após o peneiramento. Esse resultado influencia na quantidade de água de amassamento das argamassas, por isso, quando foi feito o ensaio de consistência das argamassas, a partir da adição de 15% de resíduo foi necessário acrescentar o aditivo superplastificante.

4.1.5 Fluorescência de raios X (FRX)

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 Tabela 7 apresenta o resultado da análise química dos óxidos encontrados na amostra do resíduo de compósito geopolimérico. Os óxidos majoritários foram dióxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3) devido ao aluminossilicato presente no resíduo, elementos que estão ligados diretamente com a atividade pozolânica.

Tabela 7 – 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
LOI	15,82

Fonte: Autoria própria, 2022.

A Tabela 8 apresenta, de forma sucinta, os resultados obtidos dos ensaios de

caracterização físico-químicos e os requisitos da NBR 12653:2014 para cada propriedade. Segundo esta norma, o resíduo se classificaria na classe N que contempla pozolana natural ou artificial.

Tabela 8 – 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 %

Fonte: Autoria própria, 2022.

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 12653:2014, 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 12653:2014 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 12653:2014 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 (ABNT, 2018), esse gel é formado na reação álcali-sílica (RAS) que ocorre entre hidroxidos 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.

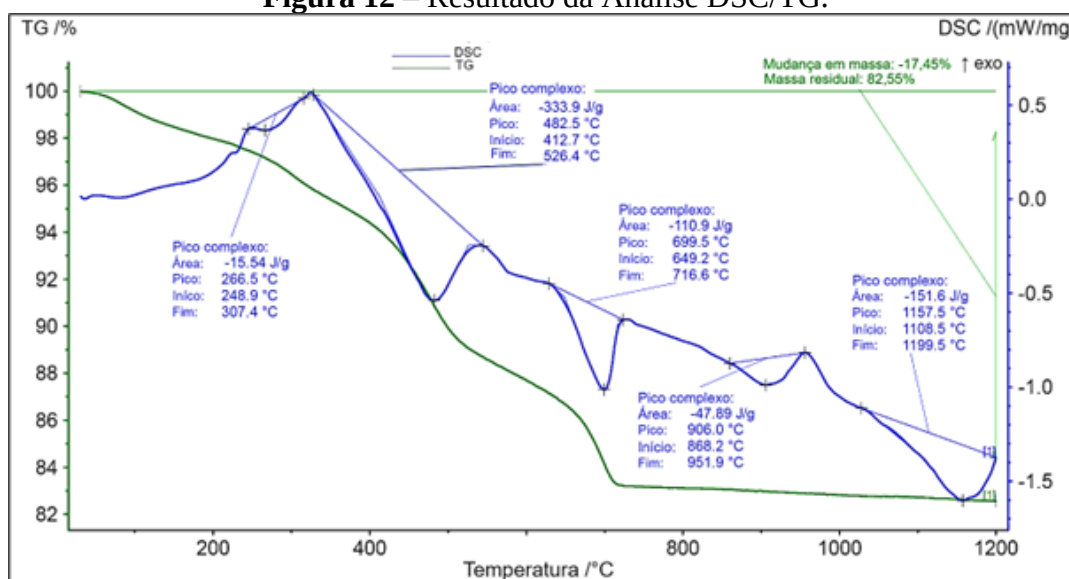
Entretanto, Mehta e Monteiro (2008) afirmam que cimentos contendo menos de 0,6% de óxido de sódio equivalente e concretos com teor de álcalis abaixo 3 kg/m³ no concreto não sofrem expansão deletéria devido à reação álcali-agregado. Segundo os mesmos autores, material reativo abaixo de 75mm, apesar de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

Testes de reatividade alcalina feito por Davidovits (2005), pelo método de expansão de barra de argamassa, realizados em 1990, de acordo com a ASTM C227 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.

4.1.6 Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial e Termogravimétrica (DSC/TG)

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/min. A análise apresentou regiões de perda de massa e mudanças de fase no termograma. A Figura 12, 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.

Figura 12 – Resultado da Análise DSC/TG.

Fonte: Autoria própria, 2022.

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).

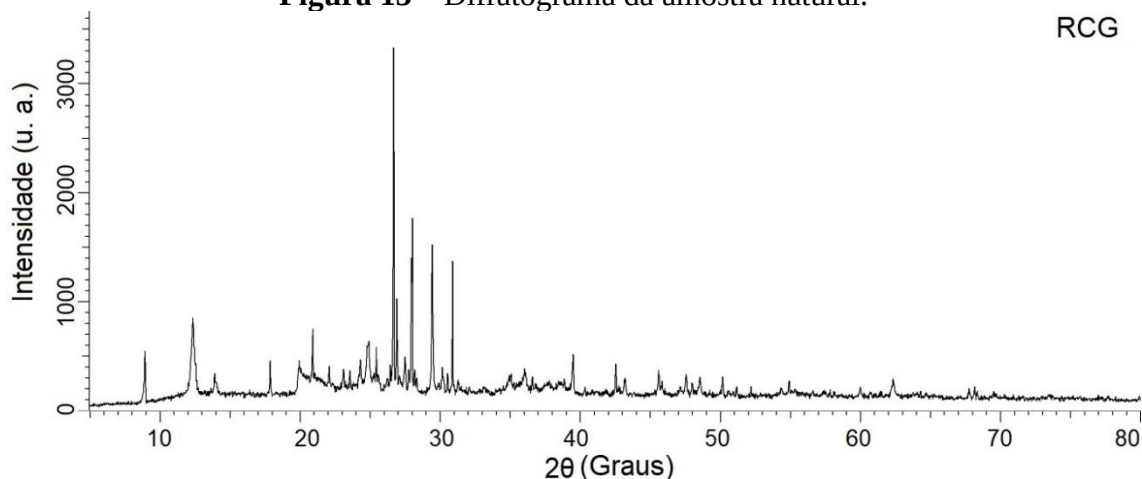
Já o pico em 699,5°C representa a descarbonatação das fases carbonáceas, como a calcita e a dolomita, este evento também inclui perda de massa e um pico endotérmico. Os eventos que ocorreram acima de 900°C, com pouca ou nenhuma perda de massa, podem estar relacionados a combustão de matéria orgânica 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.

4.1.7 Difração de Raios X (DRX)

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 -2 θ . A Figura 13 apresenta 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 2θ .

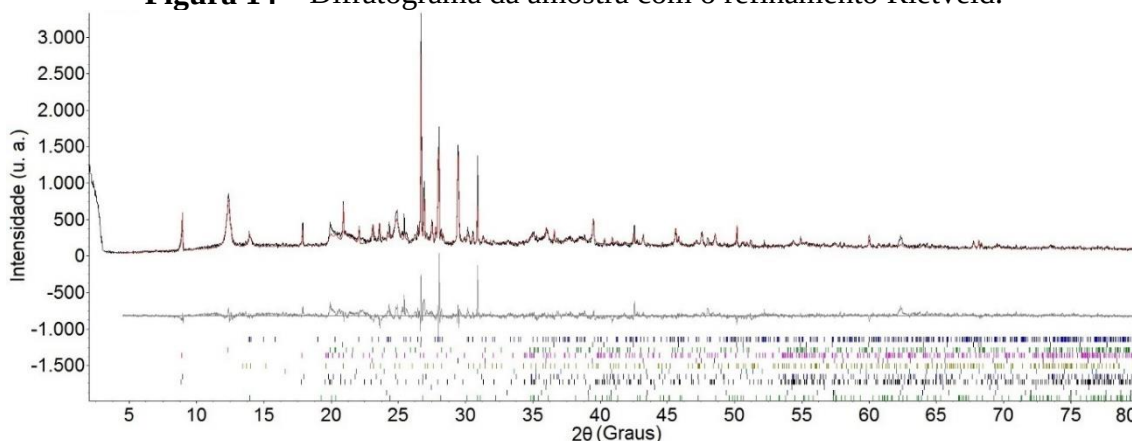
Figura 13 – Difratoograma da amostra natural.



Fonte: Autoria própria, 2022.

A quantificação mineralógica foi obtida pelo método de refinamento Rietveld, que se baseia no ajuste de uma composição teórica calculada ao difratograma experimental. A Figura 14 apresenta o ajuste do refinamento Rietveld no difratograma da amostra analisada e a Tabela 9 apresenta os valores de cada fase cristalina encontrada no resíduo após o ensaio.

Figura 14 – Difratoograma da amostra com o refinamento Rietveld.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Tabela 9 – Determinação da 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
Illita	6,34
Ortoclásio	5,67
Egirina	4,19
Dolomita	4,00
Muscovita	3,42
Rutilo	1,26
Hematita	0,74
Celadonita	0,62

Fonte: Autoria própria, 2023.

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.

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).

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.

4.2 Avaliação da atividade pozolânica

Os ensaios com argamassa de cimento Portland e com cal foram realizados no laboratório de Materiais de Construção do IFG.

4.2.1 Definição da 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. A água utilizada nos ensaios deste trabalho é oriunda da Companhia de Saneamento de Goiás (SANEAGO) do município de Goiânia/GO.

Esta quantidade de material foi definida pela NBR 7215:2019, que prescreve o método que deve ser utilizado para determinar a resistência a 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 5752:2014. 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 deste 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 7215:2019, para a argamassa de referência, o índice de consistência é considerado normal quando se apresentar no intervalo de 165 ± 5 mm. E segundo a NBR 5752:2014, 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 15 ilustra o ensaio de determinação do índice de consistência da argamassa.

Figura 15 – Ensaio de índice de consistência.

Fonte: Autoria própria, 2022.

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 10 apresenta a composição das argamassas elaboradas.

Tabela 10 – 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

Fonte: Autoria própria, 2023.

4.2.2 Atividade Pozolânica com cimento Portland

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 16 apresenta os corpos de prova nos moldes.

Figura 16 – Corpos de prova nos moldes.

Fonte: Autoria própria, 2022.

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 17 ilustra os corpos de prova imersos.

Figura 17 – Corpos de prova imersos em água para cura.

Fonte: Autoria própria, 2022.

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, conforme Figura 18.

Figura 18 – Prensa hidráulica do SENAI.

Fonte: Autoria própria, 2022.

A Tabela 11 apresenta os resultados referentes à determinação de resistência à compressão das argamassas ensaiadas aos 7, 28 e 63 dias. Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), a resistência à compressão com CP II-F-32 aos 7 dias deve ser $\geq 20\text{MPa}$ e aos 28 dias $\geq 32\text{MPa}$, logo o ensaio da argamassa de referência ficou dentro dos padrões. Além disso, a NBR 7215:2019 prescreve que o desvio relativo máximo (DRM) de quatro valores de tensão não pode exceder 6%, e pode-se observar que isto não aconteceu neste ensaio.

Tabela 11 – Resistência à compressão com cimento Portland.

Argamassa	7 Dias			28 Dias			63 Dias		
	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	DRM	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	DRM	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	DRM
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%

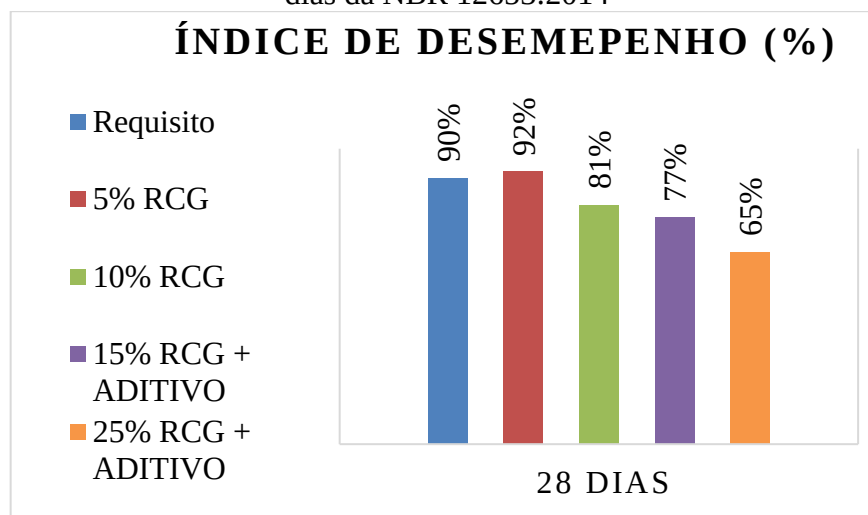
Fonte: Autoria própria, 2023.

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 11, 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 argamassa, calculou-se o índice de desempenho com cimento Portland. Em seguida, esses índices foram comparados com o requisito NBR 12653:2014 de 90% aos 28 dias. A Figura 19 mostra o resultado do índice de desempenho de cada argamassa com substituição parcial do cimento Portland e o requisito na idade de 28 dias.

Figura 19 – Gráfico do índice de desempenho de cada argamassa e o requisito de 90% aos 28 dias da NBR 12653:2014



Fonte: Autoria própria, 2022.

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 NBR12653:2014 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.

4.2.3 Atividade Pozolânica com Cal

Para determinar a quantidade de água necessária para a mistura de argamassa com cal, realizou-se o ensaio de índice de consistência. Esse índice é determinado pelo ensaio do abatimento do tronco de cone, onde a argamassa é colocada em um cone padronizado e a altura que a argamassa se espalha após a remoção do cone é medida. A NBR 7215:2019 descreve o método para o ensaio e determina que a consistência deve estar no intervalo de 220 e 230 mm.

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 rapidamente, 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.

A NBR 12653:2014 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.

No primeiro ensaio, ao adicionar 250 g de água o índice de consistência foi de 228 mm (dentro da faixa recomendada pela NBR 5751:2015), e o resultado da resistência à compressão 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.

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. Isto se deve ao fato da NBR 5751:2015 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 influencia na sua resistência à compressão.

Após avaliação dos dois ensaios realizados das argamassas com cal os resultados finais 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 5752:2014 sugere a adição de um aditivo superplastificante para manter o índice de consistência solicitada em norma, mas esta opção não é empregada na NBR 5751:2015.

4.3 Discussões

Um dos principais pontos reverberados nesta pesquisa é a necessidade do reaproveitamento de resíduos de construção civil, com pleno entendimento normativo socio-ambiental em relação ao descarte de resíduos, abrindo discussões quanto à reutilização. É possível agregar valor aos resíduos e preservar o meio ambiente dando a eles uma finalidade, além de reduzir custos com matéria prima, descarte, energia de produção, transporte.

O gerenciamento de resíduos da construção civil é carente de estudos que viabilizam o reaproveitamento de forma segura e eficaz dos resíduos de compósito geopolimérico, sendo esta uma das dificuldades encontradas. Há necessidade de ampliação do estudo técnico em relação ao resíduo por ser advindo de um pré-moldado de compósito geopolimérico, novo no mercado. Outra dificuldade é em relação a composição do resíduo utilizado na pesquisa pois é um compósito, em que a quantidade de materiais agregados não está definida, o que acarretou resultados distintos nos ensaios de caracterização do resíduo, como a perda ao fogo.

Em relação aos erros cometidos durante a execução da pesquisa, está a aquisição do agregado miúdo, areia, sem ser padronizada pelo IPT. Isso gerou retrabalho na realização dos ensaios com as argamassas e desperdício de todo material usado na composição das argamassas.

Uma das inferências na execução do estudo é que o resíduo não pode ser usado como pozolana, pois não atingiu os requisitos da norma NBR 12653:2014. Ao final da pesquisa ficou evidente a necessidade da continuidade ao estudo do resíduo de compósito geopolimérico para verificar a hipótese de que, este pode ser utilizado como enchimento, pois a substituição parcial do cimento por 5% do resíduo não prejudicou a resistência mecânica da argamassa.

Conclusão

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 12653:2014. 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% 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 pelo 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.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Após a condução desta pesquisa, surgiram novas perspectivas de estudo que resultaram em algumas sugestões:

- Realizar um estudo de expansão em barras de argamassa para avaliar a adição do RCG frente à reação álcali-sílica;
- Realizar a calcinação do resíduo a fim de confirmar o efeito pozolânico.

Referências

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. São Paulo: ABRELPE, 2021.

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, 1 maio 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais Pozolânicos: Determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais Pozolânicos: Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento: Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos: Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

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

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: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17051**: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2022

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland: Análise química: Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

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.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 178–189, jun. 2015.

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, 3 jul. 2021.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer chemistry and sustainable development. **Proceedings of the World Congress Geopolymer**. V. 1, p. 9-15, 2005.

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.; HUANG, G.H.; CHEN, J.; WANG, D.; NANJING, X.T.; CO, H.T. Early mechanical property and durability of geopolymer, in Davidovits J (ed.) **Geopolymer: Green Chemistry and Sustainable Development Solutions**, Institut Géopolymère, Saint-Quentin, 117–120, 2005.

LEHNE, J.; PRESTON, F. **Chatham House Report Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and concrete #ConcreteChange**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/2018-06-13-making-concrete-change-cement-lehne-preston-final.pdf>>.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1ª ed. São Paulo, Pini, 573 p. 1994.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3.ed. São Paulo: Ibracon (Instituto Brasileiro do Concreto), 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.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª ed. Porto Alegre, Bookman, 888 p. 2016.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Ligantes geopoliméricos: uma alternativa ambiental ao cimento Portland. **INGENIUM: revista da ordem dos engenheiros**. ISSN 08705968.116. p. 66-68, 2009.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo argamassa**. 2ª ed. Porto Alegre, EDIPUCRS, 188 p. 2012.

SINGH, N. B.; MIDDENDORF, B. Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 950–618, 20 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, 1 jan. 2020.