



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



Gabriel Alves França

Análise das propriedades de pastas geopoliméricas
produzidas com aglomerantes álcali-ativados
compostos por resíduo de mármore e ardósia

OURO PRETO

2026

Gabriel Alves França

Análise das propriedades de pastas geopoliméricas produzidas
com aglomerantes álcali-ativados compostos por resíduo de
mármore e ardósia

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção do
Grau de Engenheiro Civil na Universidade
Federal de Ouro Preto.

Orientador: Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva

Coorientador: Me. Gustavo Dias Ramos

OURO PRETO

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F814a França, Gabriel Alves.

Análise das propriedades de pastas geopoliméricas produzidas com aglomerantes álcali-ativados compostos por resíduo de mármore e ardósia. [manuscrito] / Gabriel Alves França. - 2026.

62 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva.

Coorientador: Me. Gustavo Dias Ramos.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Materiais de construção. 2. Polímeros - Geopolímero. 3. Resíduos como material de construção. 4. Mármore. 5. Ardósia. I. Silva, Guilherme Jorge Brigolini. II. Ramos, Gustavo Dias. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624.014

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriel Alves França

Análise Das Propriedades De Pastas Geopoliméricas Produzidas Com Aglomerantes
Álcali-Ativados Compostos Por Resíduo De Mármore E Ardósia

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal
de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil

Aprovada em 25 de fevereiro de 2026

Membros da banca

Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Gustavo Dias Ramos - Coorientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Me. Matheus Henrique Dela Costa - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. José Agenor Carvalho Junior - Universidade Federal de Ouro Preto

Guilherme Jorge Brigolini Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de
Conclusão de Curso da UFOP em 27 de fevereiro de 2026



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Jorge Brigolini Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/03/2026,
às 10:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1073274** e o código CRC **E89D4001**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, Senhor da vida, meu Redentor e Salvador, pelo sustento e amparo;

À minha noiva, Lhays, aos meus pais Carlos e Denise, ao meu irmão Felipe e a todos os meus familiares e amigos, pela dedicação, incentivo e carinho;

Aos meus orientadores, Professor Guilherme e Gustavo e ao grupo Ative pela oportunidade e apoio neste trabalho;

A todos que contribuíram para que eu alcançasse esta vitória;

Muito obrigado!

“Porque Deus amou de tal modo o mundo, que lhe deu seu Filho unigênito, para que todo o que crê nele não pereça, mas tenha a vida eterna”

(João 3, 16)

RESUMO

A construção civil está entre os setores econômicos que mais consomem recursos naturais e geram impactos ambientais no mundo, sendo a fabricação de cimento Portland um dos processos industriais com maior contribuição para emissão de dióxido de carbono. Diante desse cenário, tem-se ampliado o desenvolvimento de estratégias voltadas à incorporação de materiais alternativos que possibilitem a diminuição do consumo de matérias-primas convencionais e consequente mitigação de impactos ambientais. Este trabalho investiga a incorporação dos resíduos de mármore branco e ardósia, duas rochas ornamentais amplamente utilizadas na construção civil, para a produção de geopolímero. Com o objetivo de fornecer uma alternativa sustentável ao concreto convencional, bem como reduzir os impactos ambientais gerados pelo descarte inadequado das rochas ornamentais, a pesquisa avalia o desempenho da matriz geopolimérica. Para isso, os materiais utilizados como aglomerantes álcali-ativados foram caracterizados em diversos testes laboratoriais: caracterização física (composição granulométrica e massa específica), caracterização mineralógica (DRX), caracterização química (FRX e perda ao fogo), além de ensaios mecânicos de resistência à compressão e resistência à tração executados nos protótipos produzidos. Foram desenvolvidos e moldados dez traços diferentes, que então foram divididos em 2 tempos de curas: 7 e 28 dias. Além disso, para cada tempo de cura os protótipos tiveram 3 temperaturas de cura distintas: 25°C, 50°C e 100°C. A partir dessa diferença de cura entre cada protótipo, observou-se a grande influência do processo de cura no desempenho de cada corpo de prova testado, onde o tempo de cura maior rendeu uma significativa melhora na resistência mecânica (cerca de duas vezes mais resistente, em geral). Os resultados ainda mostraram que o processo de calcinação da ardósia também proporcionou um aumento da resistência mecânica de cada traço, aumentando em até 5 vezes sua resistência para alguns traços testados. Foi constatado que a utilização dos resíduos de mármore branco e ardósia é promissora para o uso em pastas geopoliméricas, apresentando considerável potencial para utilização como material construtivo.

Palavras-chave: Geopolímero, ativação alcalina, resíduo de mármore, resíduo de ardósia.

ABSTRACT

The construction industry is among the economic sectors that consume the most natural resources and generate significant environmental impacts worldwide, with the production of Portland cement being one of the industrial processes that most contributes to carbon dioxide emissions. In this context, the development of strategies aimed at incorporating alternative materials has expanded in order to reduce the consumption of conventional raw materials and consequently mitigate environmental impacts. This study investigates the incorporation of white marble and slate residues, two ornamental stones widely used in the construction industry, for the production of geopolymers. With the aim of providing a sustainable alternative to conventional concrete, as well as reducing the environmental impacts caused by the improper disposal of ornamental stone waste, the research evaluates the performance of the geopolymeric matrix. To this end, the materials used as alkali-activated binders were characterized through several laboratory tests: physical characterization (particle size distribution and specific gravity), mineralogical characterization (XRD), chemical characterization (XRF and loss on ignition), as well as mechanical tests of compressive strength and tensile strength performed on the produced specimens. Ten different mix designs were developed and molded, which were then divided into two curing times: 7 and 28 days. In addition, for each curing time, the specimens were subjected to three different curing temperatures: 25°C, 50°C, and 100°C. Based on the differences in curing conditions among the specimens, a strong influence of the curing process on the performance of each tested sample was observed, with longer curing times resulting in a significant improvement in mechanical strength (generally about twice as strong). The results also showed that the calcination process of slate provided an increase in the mechanical strength of each mix design, raising its strength by up to five times for some of the tested mixtures. It was concluded that the use of white marble and slate residues is promising for application in geopolymeric pastes, presenting considerable potential for use as a construction material.

Keywords: Geopolymer, alkali activation, marble waste, slate waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tambores preenchidos com resíduo de mármore na ADAMAG.....	27
Figura 2 – Fluxograma do processo produtivo.....	28
Figura 3 – a) Mármore dentro de estufa para secagem; b) Mármore seco armazenado. ..	29
Figura 4 – Moinho de bolas Solab SL-36/21.....	30
Figura 5 – Resíduo de mármore ao final do beneficiamento.....	30
Figura 6 – Resíduo de ardósia.	31
Figura 7 – Resíduo de ardósia calcinado.....	31
Figura 8 – Hidróxido de sódio puro em escamas.....	32
Figura 9 – Solução de hidróxido de sódio.....	33
Figura 10 – Fluxograma de produção da pasta.....	34
Figura 11 – Recipiente com a pasta já totalmente misturada.	35
Figura 12 – Moldes metálicos com os corpos de prova.	35
Figura 13 – Corpos de prova retirados dos moldes e identificados.	36
Figura 14 – a) Estufa para cura em 100°C; b) Caixa térmica para cura em 50°C e 25°C.	36
Figura 15 – Equipamento de análise granulométrica.....	38
Figura 16 – Ensaio de massa específica no frasco de Le Chatelier.	39
Figura 17 – Representação do corpo de prova e apoios.....	40
Figura 18 – Corpo de prova durante ensaio de resistência à tração.....	40
Figura 19 – Equipamento preparado para iniciar ensaio.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do material de cada artigo.....	26
Tabela 2 – Proporção de material em cada traço.....	34
Tabela 3 – FRX do resíduo de mármore.	43
Tabela 4 – FRX do resíduo de ardósia.....	43
Tabela 5 – Distribuição granulométrica dos resíduos.....	47
Tabela 6 – Absorção de água de cada traço.	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Artigos sobre geopolímeros com uso de mármore e ardósia.	23
--	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – DRX do resíduo de mármore.	44
Gráfico 2 – DRX do resíduo de ardósia.	45
Gráfico 3 – Distribuição granulométrica dos resíduos.	46
Gráfico 4 – Resistência à tração (7 dias).	48
Gráfico 5 – Resistência à tração (28 dias).	48
Gráfico 6 – Resistência à compressão (7 dias).	49
Gráfico 7 – Resistência à compressão (28 dias).	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM	Agência Nacional de Mineração
DRX	Difração de Raios X
ES	Espírito Santo
FRX	Fluorescência de Raios X
MG	Minas Gerais
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVO.....	16
1.1.1. Objetivos específicos	16
1.2. JUSTIFICATIVA.....	17
2. REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1. GEOPOLÍMERO: DESCRIÇÃO E PRODUÇÃO	18
2.2. MÁRMORE: UTILIZAÇÃO, RESÍDUO E REAPROVEITAMENTO	19
2.3. ARDÓSIA: UTILIZAÇÃO, RESÍDUO E REAPROVEITAMENTO.....	20
2.4. CALCINAÇÃO.....	21
2.5. ATIVAÇÃO ALCALINA	21
2.6. GEOPOLÍMERO COM RESÍDUOS DE MÁRMORE OU ARDÓSIA.....	22
3. METODOLOGIA	27
3.1. MATERIAIS	27
3.1.1. Resíduo de Mármore.....	27
3.1.2. Resíduo de Ardósia	27
3.1.3. Ativador Alcalino – Hidróxido de Sódio	27
3.2. MÉTODOS	28
3.3. CARACTERIZAÇÃO	37
3.3.1. Fluorescência de Raios X (FRX).....	37
3.3.2. Difração de Raios X (DRX).....	37
3.3.3. Composição Granulométrica	38
3.3.4. Massa Específica	38
3.3.5. Resistência Mecânica à Tração.....	39

3.3.6.	Resistência Mecânica à Compressão	41
3.3.7.	Absorção de Água.....	41
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1.	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)	43
4.2.	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	44
4.3.	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	45
4.4.	MASSA ESPECÍFICA	47
4.5.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	47
4.6.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	49
4.7.	ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	51
5.	CONCLUSÃO	53
5.1.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	54
	REFERÊNCIAS.....	56

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a sustentabilidade e a gestão de resíduos sólidos tem impulsionado pesquisas voltadas para a reutilização de subprodutos industriais ou mesmo o descarte mais adequado (KORE *et al.*, 2020). Segundo Savazzini-Reis *et al.* (2019), no ano de 2018 o Brasil alcançou uma produção de 9 milhões de toneladas (Mt) de rochas ornamentais, e 36,2% disso (3,26 Mt) se tornou resíduo. Dentre esses resíduos, os rejeitos provenientes da indústria do mármore e da ardósia representam um grande desafio ambiental devido a esse elevado volume de produção (CARVALHO *et al.*, 2007). Esses materiais têm potencial para serem reaproveitados em aplicações inovadoras, como na produção de geopolímeros, um tipo de material cimentício com propriedades sustentáveis: menores emissões de dióxido de carbono (CO₂) em comparação ao cimento Portland convencional e incorporação de produtos que seriam previamente descartados pela indústria (CARVALHO *et al.*, 2007; KORE *et al.*, 2020).

Os geopolímeros são compostos inorgânicos resultantes da ativação alcalina de materiais ricos em sílica e alumina, que podem apresentar propriedades mecânicas comparáveis ou superiores às do cimento Portland tradicional (Lage e Moretti, 2025; Singh e Middendorf, 2020). Entretanto, não é qualquer material rico em sílica ou alumina que será capaz de gerar um geopolímero, e nem todo geopolímero terá propriedades melhores que o concreto (Lage e Moretti, 2025; SANTOS *et al.*, 2020; Singh e Middendorf, 2020). A incorporação de resíduos de mármore branco e ardósia na formulação desses materiais ainda é pouco explorada, sendo necessário compreender melhor sua viabilidade técnica e impacto nas propriedades do material final (BELTRÁN *et al.*, 2024; ÇELIK, 2023).

O mármore e a ardósia são rochas naturais amplamente utilizadas na construção civil e na decoração devido às suas características estéticas e propriedades físicas (SUFIAN *et al.*, 2021; MARVILA *et al.*, 2021). Conforme levantamento realizado pela Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais, o Brasil exportou no primeiro trimestre de 2024 aproximadamente 317 mil toneladas do produto, totalizando um valor de 198,6 milhões de dólares (ABIROCHAS, 2024).

O mármore é uma rocha metamórfica que pode ser composta predominantemente por calcita (carbonato de cálcio) e neste caso chamado de mármore calcítico, ou dolomita (carbonato de cálcio e magnésio), denominado mármore dolomítico (ANJUM *et al.*, 2024; CITAK *et al.*, 2023). O presente trabalho foi realizado inteiramente com o segundo tipo, o mármore

dolomítico. A ardósia, por sua vez, é uma rocha metamórfica composta principalmente por minerais como quartzo, muscovita e clorita (PARADELO *et al.*, 2008). A exploração do mármore e da ardósia envolve processos de corte e acabamento que geram resíduos sólidos e lamas. Estes resíduos, se não gerenciados adequadamente, podem causar impactos ambientais, como a contaminação do solo e dos recursos hídricos (LEZZERINI *et al.*, 2022; AHMAD *et al.*, 2022).

A extração, o beneficiamento e a comercialização dessas rochas geram uma quantidade significativa de resíduos, pois apenas no ano de 2018, aproximadamente 3,26 milhões de toneladas foram gerados (SAVAZZINI-REIS *et al.*, 2019), o que representa um desafio ambiental considerável. Nesse contexto, a pesquisa sobre a resistência mecânica de pastas produzidas com aglomerantes álcali-ativados compostos por resíduos de mármore e ardósia surge como uma alternativa promissora para a valorização desses subprodutos e a promoção da sustentabilidade no setor da construção.

Os aglomerantes álcali-ativados, também conhecidos como geopolímeros, têm se destacado por suas elevadas resistências mecânicas e durabilidade, além de apresentarem menor pegada de carbono em comparação ao cimento Portland tradicional (PROVIS, 2018). A utilização de resíduos ricos em sílica e alumina, como os provenientes do beneficiamento do mármore e da ardósia, como precursores na síntese desses aglomerantes, representa uma estratégia eficaz para a gestão de resíduos e a produção de materiais sustentáveis (MARRAS *et al.*, 2022). Diante disso, o presente trabalho desenvolverá um geopolímero utilizando resíduo de mármore e resíduo de ardósia como precursores, e como ativador uma solução de Hidróxido de Sódio (NaOH) 10 molar. Serão conduzidos ensaios para a caracterização química e microestrutural dos materiais utilizados, além de caracterização física e mecânica dos corpos de prova moldados.

1.1. OBJETIVO

Avaliar a viabilidade técnica do uso dos resíduos de mármore branco e ardósia como substituto parcial ou total dos precursores tradicionais em geopolímeros.

1.1.1. Objetivos específicos

- Estudar as características físico-químicas do resíduo de mármore branco e do resíduo de ardósia e seus potenciais para aplicação em geopolímeros;

- Analisar a influência da incorporação dos resíduos de mármore branco e ardósia nas propriedades mecânicas dos geopolímeros produzidos.

1.2. JUSTIFICATIVA

Estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) orientam ações globais voltadas ao desenvolvimento sustentável. Este trabalho contribui para alguns desses objetivos. Um exemplo é o ODS de número 12, que diz respeito ao consumo e produção responsáveis, por incorporar práticas de reciclagem e valorização de resíduos. O ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) também é impactado, ao favorecer a redução de emissões de gases provocadores do efeito estufa oriundos da produção do cimento.

Conforme Santos *et al.* (2020), a produção de geopolímeros utilizando resíduos industriais pode reduzir a dependência do cimento Portland, material responsável por 8% das emissões globais de CO₂. Ao reutilizar mármore e ardósia, busca-se reduzir o impacto ambiental da mineração, beneficiamento e comercialização de rochas ornamentais, bem como do setor da construção civil, promovendo uma abordagem mais sustentável e alinhada aos princípios da economia circular (BABISK, 2023).

Assim, este estudo se insere em um contexto global de busca por materiais de construção mais sustentáveis, oferecendo uma alternativa viável e de menor impacto ambiental. Portanto, esta pesquisa justifica-se pela necessidade de encontrar soluções inovadoras para o gerenciamento de resíduos industriais, ao mesmo tempo em que se busca desenvolver materiais de alto desempenho para a construção civil, alinhados às demandas de sustentabilidade e eficiência.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. GEOPOLÍMERO: DESCRIÇÃO E PRODUÇÃO

De acordo com Silvestro *et al.* (2024), o cimento Portland é o material de construção mais utilizado mundialmente. De acordo com dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), o Brasil produziu 63,5 milhões de toneladas do produto somente no ano de 2022 (SNIC, 2023). Entretanto, a produção de sua matéria-prima, o clínquer, envolve um processo industrial que demanda um elevado consumo de energia e de recursos não renováveis, além de emissão de CO₂ (SILVESTRO *et al.*, 2024; MOHAMAD *et al.*, 2021). Segundo Lage e Moretti (2025), essa situação provoca elevadas emissões de gases provocadores do efeito estufa, elevando a temperatura média do planeta e ocasionando eventos climáticos mais imprevisíveis e graves. Por isso, tem-se buscado alternativas ao cimento tradicional que possam minimizar tais impactos ambientais.

Uma dessas alternativas são os materiais aluminossilicatos, isto é, de composição rica em sílica (SiO₂) ou alumina (Al₂O₃), e ativados alcalinamente. São conhecidos como geopolímeros, produto inorgânico alternativo ao cimento Portland. É produzido através da reação destes materiais, chamados precursores (como o resíduo de mármore e resíduo de ardósia) com uma solução aquosa alcalina de hidróxido de sódio (NaOH) ou silicato de sódio (Na₂SiO₃) (FIRDOUS *et al.*, 2018). Este composto foi descoberto pelo cientista de materiais Joseph Davidovits em 1979, que ao longo das décadas seguintes conduziu muitas pesquisas, publicando diversos artigos e livros sobre o assunto.

A produção de geopolímeros emite significativamente menos dióxido de carbono (CO₂), tornando-se uma alternativa ambientalmente viável (SANTOS *et al.*, 2020) ao cimento convencional. De acordo com Davidovits (2018), para produzir uma tonelada de cimento geopolimérico, são produzidos 180 quilos de dióxido de carbono, e para se produzir a mesma quantidade de cimento Portland, são gerados 1000 quilos de CO₂.

De acordo com Gavali *et al.* (2019), o geopolímero pode ter características mecânicas e químicas comparáveis ou superiores às do cimento Portland tradicional, e podem ser usados como concreto, argamassa, alvenaria e outros componentes da construção civil. Em resumo, pode-se dizer que os geopolímeros têm potencial para substituir o cimento/concreto em qualquer aplicação, com possibilidade de apresentar um desempenho melhor em solicitações

de carregamento mecânico e maior resistência a altas temperaturas se comparado com o concreto convencional, além de ser um produto mais sustentável devido à sua capacidade de incorporar materiais que seriam descartados e menor geração de CO₂ (FIRDOUS *et al.*, 2018).

2.2. MÁRMORE: UTILIZAÇÃO, RESÍDUO E REAPROVEITAMENTO

Segundo Anjum *et al.* (2024), o mármore é uma rocha metamórfica que se distingue em dois tipos principais: O mármore composto predominantemente por calcita (carbonato de cálcio) ou predominantemente dolomita (carbonato de cálcio e magnésio). O primeiro é denominado de mármore calcítico, e o segundo por mármore dolomítico, sendo ambos amplamente utilizados na construção civil e na arquitetura. Segundo Santos *et al.* (2024), sua aplicação inclui revestimentos, pisos, bancadas, esculturas e ornamentos.

Sua utilização começou há cerca de 5.000 anos, sendo empregado no Egito Antigo para a construção de túmulos e pirâmides. Na Grécia Antiga e durante o Império Romano, foi amplamente utilizado em templos, monumentos e esculturas, devido à sua durabilidade e estética, além de simbolizar poder e autoridade. Durante a Idade Média e o Renascimento o material se fez presente em igrejas e castelos. (FANT, 2001)

Segundo Silva *et al.* (2024), o setor de rochas ornamentais no Brasil é um dos mais expressivos do mundo, sendo o quinto maior produtor global, e o mármore destaca-se como um dos principais materiais comercializados. Estados como Espírito Santo, Minas Gerais, Ceará e Bahia concentram a maior parte da produção nacional (ANM, 2022; SILVA *et al.*, 2024). A extração e beneficiamento do mármore envolvem processos como corte, polimento e acabamento, gerando produtos de alto valor agregado, seguindo com seu status de material nobre. No entanto, sua utilização gera uma grande quantidade de resíduos sólidos e lama durante seu processamento (TAZZINI *et al.*, 2024).

O setor da construção civil tem explorado alternativas sustentáveis para reduzir o impacto ambiental causado por estes rejeitos, como podemos analisar em Marras *et al.* (2022) e em Sufian *et al.* (2021). Segundo Moreno *et al.* (2022) e Sufian *et al.* (2021), os resíduos de mármore podem ser incorporados em argamassas, concretos e tijolos, substituindo parte dos agregados convencionais. A incorporação de resíduos de mármore em materiais cimentícios também pode melhorar a durabilidade e resistência mecânica dos produtos, ao mesmo tempo

que reduz os impactos ambientais causados pela deposição inadequada desses rejeitos (MARQUES *et al.*, 2021).

2.3. ARDÓSIA: UTILIZAÇÃO, RESÍDUO E REAPROVEITAMENTO

A ardósia é uma rocha metamórfica formada a partir do xisto argiloso submetido a pressão e temperaturas elevadas (PARADELO *et al.*, 2008). Sua estrutura laminar e de fácil clivagem permite que seja facilmente dividida em placas finas, o que a torna amplamente utilizada como material de revestimento (FUSCALDI *et al.*, 2022; PARADELO *et al.*, 2008). Sua composição mineralógica é principalmente quartzo, apresentando também clorita, muscovita e albita, como identificado por Beltrán *et al.* (2024).

Seu uso começou por volta do século IX na Europa Medieval, sendo empregada em telhados e calçamentos, e se popularizou por todo o continente nos séculos seguintes (Jope e Dunning, 1954). Atualmente, a ardósia continua sendo utilizada na construção civil como revestimento e em coberturas. De acordo com Cardenes *et al.* (2015), o Brasil é um dos principais produtores e exportadores de ardósia, com destaque para o estado de Minas Gerais, responsável por 94% da produção nacional (ANTUNES *et al.*, 2020).

O processo de extração e beneficiamento gera resíduos sob a forma de placas quebradas e pó, que se descartados inapropriadamente, causam diversos impactos ambientais, como assoreamento de corpos hídricos e contaminação do solo (FUSCALDI *et al.*, 2022). Diante desse impacto, muitas pesquisas têm buscado alternativas de reaproveitamento e demonstram que os rejeitos da ardósia podem ser aproveitados na fabricação de compósitos poliméricos e materiais cimentícios, pavimentos (ANTUNES *et al.*, 2020; ASTARIANI *et al.*, 2021; BELTRÁN *et al.*, 2024; KANG *et al.*, 2021).

Uma pesquisa realizada por Toledo (2016) analisou a reatividade do resíduo de ardósia em matrizes cimentícias. O estudo avaliou as características físicas e químicas do resíduo e sua influência nas propriedades mecânicas e de durabilidade das matrizes cimentícias. Os resultados indicaram que a incorporação do resíduo de ardósia pode melhorar a resistência mecânica e a durabilidade dos materiais devido às suas propriedades pozolânicas, isto é, a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio, subproduto da hidratação do cimento (FIRDOUS *et al.*, 2018), o que diminui o consumo de cimento Portland, promovendo uma construção mais sustentável. (TOLEDO, 2016)

2.4. CALCINAÇÃO

A calcinação é um processo termoquímico que consiste no aquecimento a altas temperaturas, geralmente entre 600°C e 1000°C, aplicado a materiais inorgânicos com o objetivo de remover impurezas voláteis, alterar a estrutura cristalina e melhorar propriedades físico-químicas (Araújo e Silva, 2003; FUSCALDI *et al.*, 2022). É um processo amplamente utilizado na indústria química, metalúrgica e na produção de materiais de construção. Um exemplo que possui grande aplicação é o da indústria cimenteira. Na produção do clínquer, o calcário e a argila são calcinados para formar os principais compostos do cimento (PATIL *et al.*, 2021).

No contexto da ardósia, a calcinação tem sido estudada como uma técnica para ativar as propriedades pozolânicas dos resíduos gerados em seu beneficiamento (FUSCALDI *et al.*, 2022). De acordo com o mesmo autor, a calcinação do resíduo de ardósia pode alterar sua estrutura química e aumentar sua reatividade, tornando-o um material potencialmente útil na produção de compósitos cimentícios sustentáveis. Esse estudo ressalta a importância da calcinação como método eficaz para o aproveitamento dos resíduos de ardósia, promovendo a sustentabilidade e a eficiência na indústria da construção civil.

De acordo com Fuscaldi *et al.* (2022), a calcinação aumenta o tamanho médio das partículas, indicando que ocorre uma fundição entre os grãos do material. Isso pode ser prejudicial e demandar um novo processo de moagem, de forma a evitar que partículas maiores interfiram na reatividade do material. A calcinação ainda diminuiu o índice de perda ao fogo da amostra analisada (FUSCALDI *et al.*, 2022).

2.5. ATIVAÇÃO ALCALINA

A ativação alcalina é um processo químico que transforma materiais ricos em sílica e alumina em ligantes alternativos ao cimento Portland (COSTA, 2020). Esse processo envolve a reação desses materiais com soluções alcalinas, resultando em ligantes que podem apresentar alta resistência mecânica e durabilidade (BRITO, 2018). A ativação alcalina pode ser aplicada a diversos resíduos minerais, incluindo os de ardósia, formando materiais cimentícios alternativos e sustentáveis (BRITO, 2018; FUSCALDI *et al.*, 2022; SEVERO *et al.*, 2013). De acordo com Van Deventer *et al.* (2010), um material álcali ativado se refere a todo sistema aglutinante derivado da reação de um sal alcalino com um pó de silicato de sódio.

Segundo Provis (2018), compostos álcali-ativados podem ser gerados por uma ampla gama de precursores aluminossilicatos (ricos em alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2)) com diferentes disponibilidades, reatividades e valores ao longo do planeta. Cada precursor necessitará do ativador ou combinação de ativadores corretamente identificado. Em seu trabalho, Provis (2018) faz uma distinção entre materiais álcali-ativados, polímeros inorgânicos e geopolímeros. Ele descreve que material álcali-ativado é a classificação geral, abrangendo qualquer sistema aglomerante derivado da reação de um sal alcalino (sólido ou dissolvido) com um pó sólido de silicato, o que vai de encontro à definição de Van Deventer *et al.* (2010).

Provis (2018) classifica os polímeros inorgânicos como um subgrupo dos álcali-ativados, e definidos pela presença de uma rede de silicatos desordenada como fase ligante primária. Geopolímeros constituem um subconjunto ainda mais específico dos polímeros inorgânicos, nos quais a fase ligante é quase exclusivamente aluminossilicatada e apresenta elevado grau de coordenação. Para que esse gel seja formado como fase ligante principal, o teor de cálcio disponível nos componentes reagentes geralmente deve ser baixo, em vez das cadeias características dos hidratos de silicato de cálcio (C-S-H). Apesar, é possível formular misturas com teor global relativamente elevado de cálcio, mas com baixa disponibilidade desse elemento, favorecendo a formação do gel do tipo geopolimérico (PROVIS, 2018).

2.6. GEOPOLÍMERO COM RESÍDUOS DE MÁRMORE OU ARDÓSIA

Uma grande variedade de resíduos tem sido pesquisada como matérias-primas na composição de geopolímeros: cinzas volantes, escória de alto-forno, lama vermelha, resíduo de vidro, cinzas de casca de arroz, dentre outros (AZIZ *et al.*, 2023; ASTARIANI *et al.*, 2021; BELTRÁN *et al.*, 2024; Lage e Moretti, 2025; Singh e Middendorf, 2020). De acordo com Singh e Middendorf (2020), cada um destes precursores apresenta diferentes mecanismos de geopolimerização, sendo único para cada combinação de material usado.

Uma forma promissora de utilização dos resíduos de rochas ornamentais como o mármore e a ardósia se dá através da incorporação destes materiais na produção de matrizes geopoliméricas, o que favorece o meio-ambiente através da mitigação do descarte inadequado destas rochas ornamentais, além de contribuir para o desenvolvimento de novos materiais cimentícios. (BELTRÁN *et al.*, 2024; KAPLAN *et al.*, 2023).

Beltrán *et al.* (2024) em seu artigo retrata sobre a realidade na Espanha, país europeu que enfrenta desafios relacionados aos resíduos de mineração de rochas ornamentais provenientes da extração e do beneficiamento além da emissão de CO₂. Kang *et al.* (2021) cita em seu trabalho as dificuldades enfrentadas pelo governo da China em lidar com os rejeitos. O Quadro 1 apresenta alguns trabalhos que desenvolveram geopolímeros com traços constituídos, em partes ou em totalidade, por pelo menos um destes materiais como precursores. Além disso, são apresentadas as variações de metodologia usada, como o ativador alcalino escolhido, proporções entre os materiais e os principais resultados de resistência mecânica.

Quadro 1 – Artigos sobre geopolímeros com uso de mármore e ardósia.

ANO	AUTOR	MATERIAIS E METODOLOGIA	PRINCIPAIS RESULTADOS
2024	Beltrán <i>et al.</i>	Ardósia; Ativador (Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio); Variação na proporção entre Silicato e Hidróxido (1,00, 1,25, 1,66, 2,50 e 5,00).	Resistência à compressão aumentou com o aumento de Silicato na proporção e atingiu o valor máximo (27,23MPa) na proporção de 2,5. Na proporção 5,00 notou-se que houve a não reatividade da ardósia.
2023	Kaplan <i>et al.</i>	Escória de alto forno; Mármore; Ativador (Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio); Variação na proporção de mármore:escória (1:4, 2:3, 3:2, 4:1).	Resistência à compressão aumentou com o aumento de temperatura de cura (40°C e 70°C) e atingiu o valor máximo (45,8MPa) na menor proporção de quantidade de mármore.
2021	Kang <i>et al.</i>	Ardósia; Cinzas Volantes; Metacaulim; Ativador (Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio); Variação na proporção ardósia:cinza volante:metacaulim (50:45:5, 60:35:5, 70:25:5, 80:15:5, 90:5:5 respectivamente).	Resistência à compressão teve pouca diferença conforme a variação de cada traço. A quantidade maior (14%) de ativador alcalino líquido na pasta geopolimérica se mostrou muito favorável comparado à quantidades inferiores (6, 8, 10 e 12%), resultando em grande aumento na resistência mecânica: aproximadamente 10MPa (10% de ativador) para aproximadamente 25MPa (14% de ativador).

ANO	AUTOR	MATERIAIS E METODOLOGIA	PRINCIPAIS RESULTADOS
2021	Astariani <i>et al.</i>	Ardósia; Ativador (Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio); Variação na proporção precursor e ativador (70%:30%; 75%:25%; 80%:20%). Variação na razão silicato de sódio e hidróxido de sódio (1:1; 1,5:1; 2:1).	Resistência à compressão mostrou que os traços mais resistentes foram aqueles com menor quantidade de ativador (20%). Outro fator que aumentou a resistência foi a maior proporção de silicato como ativador em comparação com o hidróxido (2:1). No traço que reuniu estas duas melhores características, o autor atingiu 12,73MPa de resistência aos 28 dias. O tempo de cura maior (7 dias ou 28 dias) também favoreceu ganho de resistência.
2021	Ekinci <i>et al.</i>	Escória de alto forno; Mármore; Areia; Ativador (NaOH); Variação na proporção de mármore e areia e molaridade do ativador (5, 10 e 15 molar)	Resistência à compressão aumentou a medida em que os traços passaram a ter maior proporção de mármore do que areia. A solução 10 molar apresentou melhores resultados que as demais concentrações de ativador para todos os traços testados.
2020	Lee <i>et al.</i>	Escória de alto forno; Mármore; Ativador (SiO ₂ /Na ₂ O/Al ₂ O ₃); Variação na proporção de mármore:escória e ativadores	Resistência à compressão aumentou quando a quantidade de escória foi elevada, devido à alta reatividade deste material.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Verifica-se, portanto a importância da correta elaboração dos traços a serem testados, visando abranger uma alta gama de variabilidades e fatores que podem interferir no desempenho do produto final, tendo em vista que cada material tem seu próprio mecanismo de geopolimerização (Singh e Middendorf, 2020). Diferentes tipos e concentrações dos ativadores alcalinos também causam grande impacto no resultado final dos protótipos, pois uma concentração molar baixa demais pode não produzir a ativação alcalina, enquanto concentrações muito altas saturam o composto, podendo causar a lixiviação do ativador,

estruturas formadas de quantidades maiores da combinação OH com alumina e sílica, que não geram efeito positivo no ensaio de resistência (EKINCI *et al.*, 2021).

Semelhante ao concreto, o geopolímero também deve receber o processo de cura adequado. Enquanto no primeiro é importante mantê-lo hidratado na temperatura e umidade adequadas, evitando a evaporação de água que causa grandes patologias, o geopolímero é mais complexo (Lage e Moretti, 2025; MATSIMBE *et al.*, 2022). O geopolímero pode passar por diferentes metodologias de cura, justamente em função das particularidades do precursor utilizado em cada traço. É comum encontrar trabalhos que descrevem a cura ocorrendo em temperaturas superiores à ambiente, chegando aos 100°C, por exemplo. De acordo com Lage e Moretti (2025), o regime de cura em temperatura ambiente costuma ser adotado com o objetivo de oferecer vantagens energéticas, facilitar a aplicação e reduzir emissões de carbono.

Conforme descrito por Matsimbe *et al.* (2022) e Aziz *et al.* (2023), o tempo de cura é outro fator de grande impacto na avaliação das propriedades de uma amostra. Isso se dá pelo fato de que as reações químicas que formam a estrutura geopolimérica continuam a ocorrer mesmo após os primeiros dias de produção. A cura prolongada associada às temperaturas elevadas acelera o grau de polimerização, melhorando as características mecânicas através do fechamento dos poros, resultando numa microestrutura mais densa e forte (MATSIMBE *et al.*, 2022). Aziz *et al.* (2023) em seu trabalho comparou os resultados de uma amostra de geopolímero feita com cinza volante com 28 dias de cura, que obteve 49,3 MPa de resistência mecânica à compressão, com uma amostra que curou por 10 anos, obtendo 87,2 MPa. Estes autores ainda ressaltam que a temperatura de cura ideal pode variar entre cada matriz geopolimérica, a depender dos precursores e ativadores alcalinos utilizados.

Tabela 1 – Composição química do material de cada artigo

Composto	Beltrán <i>et al.</i> (ardósia)	Kaplan <i>et al.</i> (mármore)	Kang <i>et al.</i> (ardósia)	Astariani <i>et al.</i> (ardósia)	Ekinci <i>et al.</i> (mármore)	Lee <i>et al.</i> (mármore)
SiO ₂	50,75	0,2	41,02	49,00	0,50	1
Al ₂ O ₃	22,18	0,2	8,99	11,00	0,24	1,3
CaO	0,456	52,1	32,44	11,20	54,10	60,9
Fe ₂ O ₃	10,68	0,1	9,21	22,35	0,09	-
K ₂ O	4,63	0,5	1,5	3,37	-	-
MgO	2,68	0,9	5,28	-	1,50	-
TiO ₂	1,28	-	0,53	2,06	-	-
Na ₂ O	1,24	0,1	-	-	0,01	-
SO ₃	0,5	0,1	-	-	-	-
P ₂ O ₅	0,28	-	0,09	-	-	1,6
Perda ao Fogo	5,02	45,6	-	-	42,05	35,2
Outros	-	-	0,94	1,02	1,51	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Tabela 1 mostra que os trabalhos desenvolvidos com mármore de Kaplan *et al.*, 2023; Ekinci *et al.*, 2021; Lee *et al.* 2020 apresentam altos valores de óxido de cálcio (CaO), componente típico no material pesquisado. Isso acontece pois o mármore usado por estes trabalhos é constituído quase totalmente por calcita (CaCO₃), que quando aquecido no ensaio de perda ao fogo, sofre a decarbonatação, ou seja, a remoção do dióxido de carbono (CO₂): CaCO₃ → CaO + CO₂. O dióxido de carbono é liberado como gás, causando grande perda de massa (LIU *et al.*, 2022). Cabe ressaltar que existe uma outra variedade de mármore, o dolomítico, utilizado pelo presente trabalho, que diferentemente do calcítico, apresenta maiores teores de carbonato de cálcio e magnésio (ANJUM *et al.*, 2024; CITAK *et al.*, 2023). Por outro lado, os trabalhos de Beltrán *et al.*, 2024; Kang *et al.*, 2021; Astariani *et al.*, 2021 que foram realizados com o uso de ardósia, contam com um alto teor de sílica (SiO₂), constituinte principal também da areia e do quartzo.

3. METODOLOGIA

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Resíduo de Mármore

O material foi coletado em Cachoeiro de Itapemirim (ES), pela gerenciadora de resíduos ADAMAG. O resíduo foi retirado de uma pilha e em seguida armazenado em tambores metálicos, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Tambores preenchidos com resíduo de mármore na ADAMAG.



Fonte: ADAMAG (2023).

3.1.2. Resíduo de Ardósia

O resíduo de ardósia foi cedido por uma empresa privada da cidade de Maravilhas (MG), município que faz parte da chamada “Província da Ardósia de Minas Gerais”, região do estado mineiro conhecida por grandes reservas de ardósia. O material foi coletado pelos colaboradores da empresa e ensacado para envio.

3.1.3. Ativador Alcalino – Hidróxido de Sódio

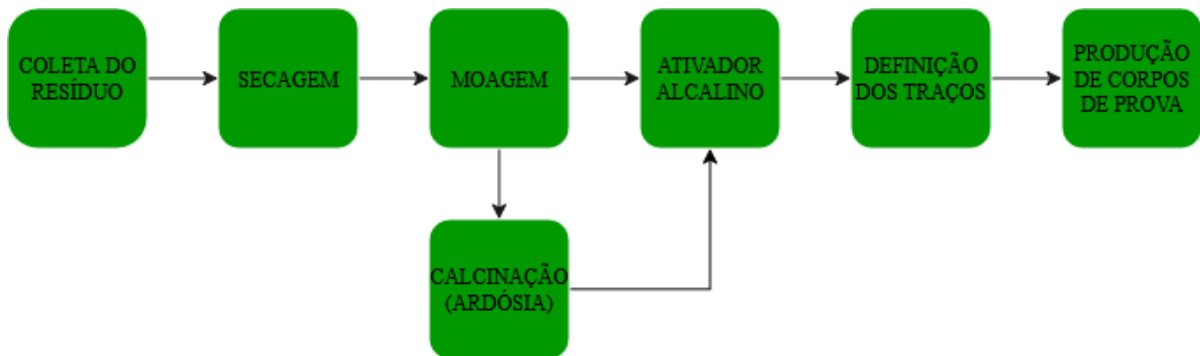
O ativador alcalino definido para esta pesquisa foi o hidróxido de sódio (NaOH), conhecido popularmente como soda cáustica, que é amplamente utilizado como ativador para geopolímeros. Este material tem fundamental importância, pois é o responsável por proporcionar o meio básico para a dissolução dos componentes reativos presentes nos resíduos. O ambiente fortemente alcalino rompe as ligações Si-O-Si e Al-O-Si dos precursores. A

concentração de NaOH influencia diretamente a cinética da reação, influenciando também nas propriedades físicas do material, como sua resistência mecânica à tração e resistência mecânica à compressão.

3.2. MÉTODOS

Para a produção das pastas geopoliméricas, os materiais utilizados deveriam passar por um processo de beneficiamento, que envolve processos importantes que começam desde a coleta dos resíduos até a produção dos corpos de prova. Tais procedimentos incluem: armazenamento em local adequado, fragmentação de blocos grandes, secagem, moagem, produção da solução aquosa com o ativador alcalino, calcinação (para a ardósia), chegando finalmente até a produção dos traços definidos e moldagem de corpos de prova. Um fluxograma é apresentado pela Figura 2 com os tópicos e sua ordem no processo deste trabalho:

Figura 2 – Fluxograma do processo produtivo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Armazenado no laboratório, o mármore se encontrava úmido e em blocos. Para o preparo do material para a pesquisa, foi inicialmente realizado o processo de quebra dos blocos grandes em fragmentos menores e a posterior secagem, para que sua umidade fosse removida. A secagem foi realizada dentro de estufas, durante 24 horas a uma temperatura de 100°C (Figura 3 ‘a’). Após o processo de secagem, o material foi armazenado adequadamente (Figura 3 ‘b’).

Figura 3 – a) Mármore dentro de estufa para secagem; b) Mármore seco armazenado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Posteriormente, o material recebeu o tratamento de moagem, em um moinho de bolas horizontal, a fim de alcançar a granulometria adequada para o processo de moldagem. O material foi moído durante 30 minutos com velocidade de 60 rotações por minuto, em volumes determinados pelo fabricante do moinho de bolas para o correto desempenho do processo. A Figura 4 apresenta o equipamento antes de iniciar o processo. O resultado obtido foi um pó seco e fino, conforme apresentado na Figura 5, e então novamente armazenado em sacos plásticos para proteger suas características e posterior uso.

Figura 4 – Moinho de bolas Solab SL-36/21.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

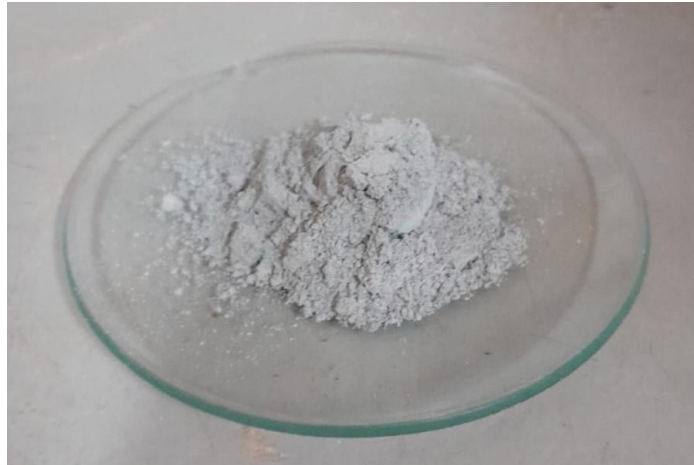
Figura 5 – Resíduo de mármore ao final do beneficiamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Ao início da pesquisa, a ardósia já estava em estado seco e moído, não sendo necessário repetir o processo anteriormente feito para o resíduo de mármore. Os cuidados necessários para a conservação do material foram importantes para evitar danos, e para isso todo o material foi abrigado em local seco e fechado. A Figura 6 retrata o pó do resíduo de ardósia.

Figura 6 – Resíduo de ardósia.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Parte do resíduo de ardósia recebeu o processo de calcinação, sendo inserido dentro de uma mufla em temperatura de 800°C, para receber o tratamento térmico por seis horas consecutivas. Após este tempo, o material foi resfriado em temperatura ambiente e em seguida novamente armazenado. A Figura 7 ilustra o resultado final do processo.

Figura 7 – Resíduo de ardósia calcinado.

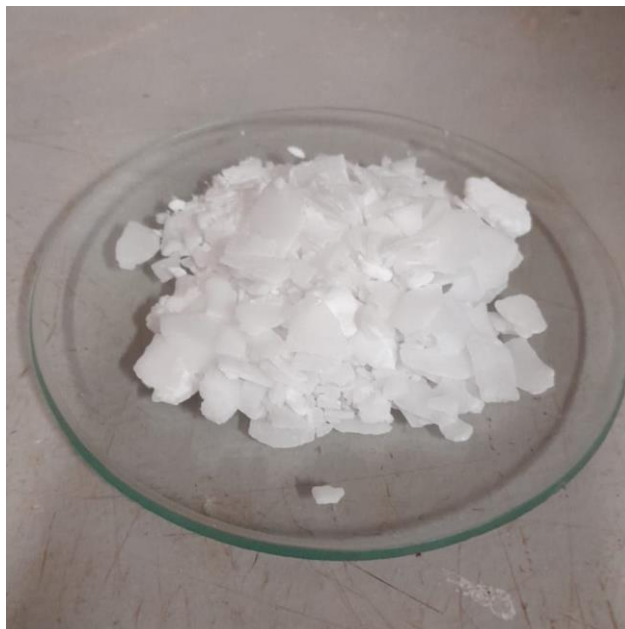


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Definiu-se que para o preparo da solução aquosa de ativador alcalino, seria utilizada uma solução 10 molar de hidróxido de sódio. Para cada litro de sua produção, foram necessários os seguintes materiais:

- NaOH (puro) em escamas (400 gramas) apresentado na Figura 8;
- Água destilada (500 mL inicialmente).

Figura 8 – Hidróxido de sódio puro em escamas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para a produção da solução alcalina, foi colocado 500 mL de água destilada em um béquer, e em seguida adicionado o hidróxido de sódio. Por ser uma reação exotérmica e liberar vapores tóxicos, todo o material foi preparado dentro da capela, sendo misturado com o bastão de vidro. Quando a solução esfriou completamente, foi transferida para o balão volumétrico de 1 litro e então completou-se com uma quantidade suficiente de água destilada para completar 1 litro de solução.

O cálculo de massa necessária de NaOH foi feito com base nos seguintes dados: Massa molar do NaOH = 40 g/mol; Molaridade desejada = 10 mol/L; Volume da solução = 1 litro. Sabendo que: massa (g) = molaridade (mol/L) \times massa molar (g/mol) \times volume (L), então: massa = 10mol/L \times 40g/mol \times 1L = 400g de NaOH. O resultado da solução é um líquido incolor, como visto na Figura 9:

Figura 9 – Solução de hidróxido de sódio.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A etapa seguinte foi a produção dos corpos de prova que seriam ensaiados nos diversos testes laboratoriais subsequentes. Foram desenvolvidos um total de 10 traços diferentes, com variação na porcentagem de cada precursor (mármore, ardósia, e ardósia calcinada) e o total de ativador alcalino, conforme apresentado na Tabela 2. A porcentagem se refere ao total da massa do precursor e do ativador para cada traço produzido.

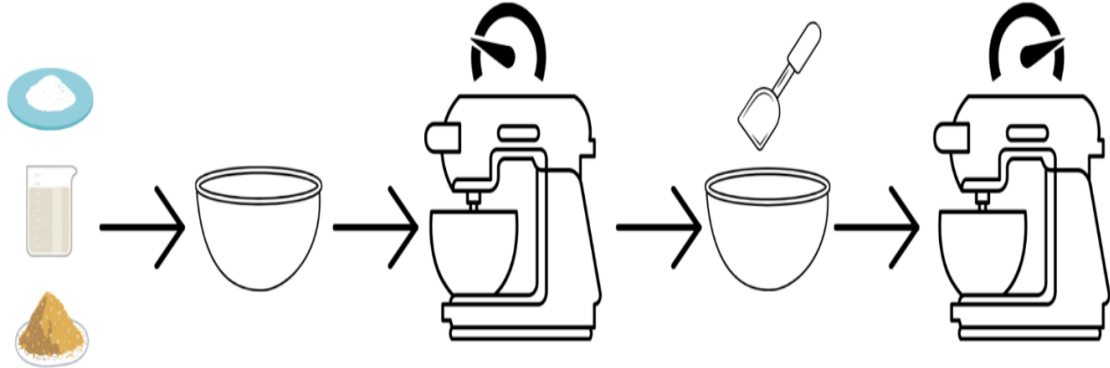
Foi determinado no início da pesquisa que todos os traços seriam compostos pela solução 10 molar de NaOH, entretanto, durante as moldagens foi discutido a ideia de se testar um traço específico com uma quantidade menor de ativador para avaliar possíveis mudanças nos resultados. O traço escolhido foi o TR-4-C-F0,5 pelo fato de seu traço análogo, TR-4-C ter apresentado o maior resultado de resistência mecânica e com isso verificar se a menor quantidade de solução alcalina iria alterar este resultado. Com os traços definidos, a moldagem foi realizada utilizando moldes metálicos prismáticos de 4cm x 4cm x 16cm e moldes plásticos quadrados de 4cm x 4cm x 4cm. A Figura 10 ilustra a ordem de cada etapa da produção da pasta geopolimérica equipamentos utilizados.

Tabela 2 – Proporção de material em cada traço.

TRAÇO	RESÍDUO DE MÁRMORE	RESÍDUO DE ARDÓSIA	ATIVADOR ALCALINO
TR-0	100%	0%	60%
TR-1	75%	25%	60%
TR-2	67%	33%	60%
TR-3	50%	50%	60%
TR-4	0%	100%	60%
TR-1-C	75%	25%	60%
TR-2-C	67%	33%	60%
TR-3-C	50%	50%	60%
TR-4-C	0%	100%	60%
TR-4-C-F0,5	0%	100%	50%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 10 – Fluxograma de produção da pasta.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Após o preparo dos moldes utilizados, cada material que seria usado foi pesado e colocado dentro de um recipiente *bowl*. Foi adicionado primeiramente os precursores e depois o ativador, em forma de solução aquosa, e então tudo foi misturado em velocidade lenta por um minuto em uma misturadora de bancada. Depois foi retirado do equipamento e misturado por um minuto manualmente, e em seguida novamente misturado no equipamento, mas em velocidade alta. Ao final do processo, se obteve uma pasta homogênea, conforme mostrado pela Figura 11.

Figura 11 – Recipiente com a pasta já totalmente misturada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Depois disso, a pasta foi colocada dentro de cada molde, preenchendo-os completamente, como mostra a Figura 12. O material foi deixado por 24 horas dentro dos moldes para que ocorresse o endurecimento e fosse possível retirá-los dos moldes. Com o material já moldado, cada traço foi dividido em 3 grupos de temperatura de cura diferentes: 100°C, 50°C e 25°C. Dentro de cada grupo de temperatura, os traços ainda foram divididos em dois tempos de cura distintos: 7 dias e 28 dias.

Figura 12 – Moldes metálicos com os corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 13 – Corpos de prova retirados dos moldes e identificados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Após a identificação de cada corpo de prova com base no seu traço, temperatura e tempo de cura (Figura 13), eles foram levados para as estufas e caixas térmicas (Figura 14), previamente ajustadas nas temperaturas definidas, para o processo de cura do material pelos próximos 7 ou 28 dias seguintes. Ao final de cada tempo prescrito, o geopolímero estava pronto para ser ensaiado nos diversos testes para avaliação de suas propriedades e características.

Figura 14 – a) Estufa para cura em 100°C; b) Caixa térmica para cura em 50°C e 25°C.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.3. CARACTERIZAÇÃO

3.3.1. Fluorescência de Raios X (FRX)

A Fluorescência de Raios X é uma análise usada para determinação de composição química de materiais, comumente usada em muitas áreas da engenharia, como materiais e mineração. A amostra é irradiada com raios X primários, e essa radiação remove elétrons das camadas internas dos átomos. Um elétron de uma camada mais externa passa a ocupar essa lacuna, e então a diferença de energia entre as camadas é liberada na forma de raios X secundários. Essa radiação emitida é chamada de fluorescência. Cada elemento químico emite raios X com energias próprias, o que permite identificar quais são os elementos químicos presentes e sua quantidade através de um detector (OYEDOTUN, 2018).

Para a análise por FRX, as amostras também estavam secas e depois procedeu-se o processo de trituração em almofariz e pistilo de porcelana. Após o peneiramento do pó em peneira de malha 45 μm , a análise de FRX foi realizada no Laboratório NanoLab, utilizando o equipamento Rayny EDX 720 Shimadzu.

3.3.2. Difração de Raios X (DRX)

De acordo com Silva (2020), a difração de raios X é empregada com o objetivo de identificar as fases cristalinas presentes no material analisado. As análises foram realizadas em um difratômetro de raios X, operando com radiação Cu-K α , sob tensão, em uma faixa angular de 2θ , passo de 0,018, e faixa 5° a 80°. As condições de ensaio foram estabelecidas de modo a garantir a reprodutibilidade dos resultados e a confiabilidade na interpretação dos difratogramas. A identificação das fases cristalinas e os resultados foram realizados por meio do *software* X'Pert HighScore Plus (Panalytical), utilizando o banco de dados cristalográfico COD (*Crystallography Open Database*).

As amostras de resíduo de mármore e resíduo de ardósia, após passarem pelo processo de secagem descrito anteriormente são produzidas através da trituração dos grãos com o uso de almofariz e pistilo. Após a moagem, o material é peneirado em peneira de malha 45 μm , minimizando efeitos de orientação preferencial e garantindo melhor representatividade dos picos difratados. O pó obtido foi analisado utilizando radiação Cu-K α conforme os parâmetros operacionais do equipamento. Para maior precisão os ensaios foram aplicados em duplicata.

3.3.3. Composição Granulométrica

A distribuição granulométrica determina a quantidade relativa de partículas em cada faixa de tamanho dentro de um material. A análise da distribuição granulométrica a *laser* do mármore e da ardósia foi feita com o equipamento *Better Size 2000*, no Laboratório de Materiais de Construção, mostrado na Figura 15. Identificar a distribuição granulométrica de um material é fundamental porque o tamanho e a proporção das partículas influenciam diretamente o comportamento físico, mecânico e químico do material (ANJUM *et al.*, 2024). Essa influência acontece devido a área de superfície das partículas. Quanto menor uma partícula, maior sua área superficial e maior sua área de contato com o ativador, favorecendo a reação alcalina.

Figura 15 – Equipamento de análise granulométrica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.3.4. Massa Específica

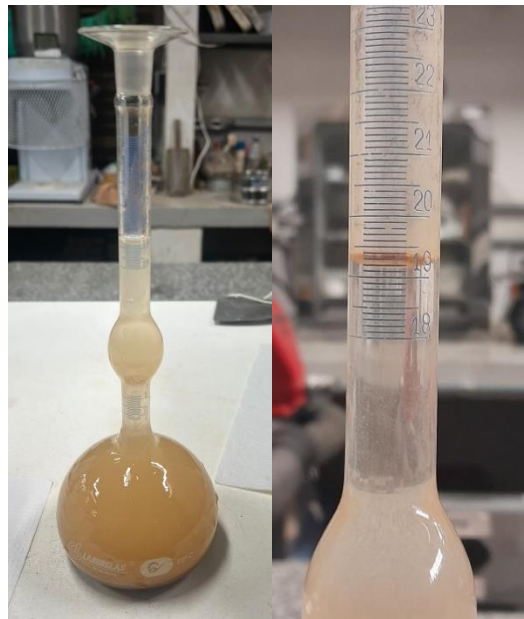
O ensaio de massa específica dos resíduos fora realizado segundo o roteiro da norma ABNT NBR NM23 (2000). Para garantir a precisão dos resultados obtidos, o ensaio foi feito em duplicata. Para verificar se o resultado está coerente, deve-se obter a mesma casa decimal em ambos resultados. A Figura 16 apresenta a execução do referido ensaio. Foram realizados dois ensaios simultaneamente, de modo a garantir as mesmas condições do ensaio. O resultado final foi a média desses dois valores.

O frasco de *Le Chatelier* foi preenchido até a marcação indicada de 0,5 com água destilada. Após, foi pesado e adicionado uma amostra de 50g de resíduo de mármore ou ardósia através do funil. Em seguida, foi feito movimentos para a homogeneização da mistura. O frasco foi deixado em repouso por 30 minutos no balde preenchido com água em temperatura de

aproximadamente 25°C. Após este tempo, foi aferida a nova marca. Com as duas marcas (V1 e V2) representando a variação volumétrica, aplica-se a Equação 1. O termo ‘ ρ ’ representa a massa específica do material ensaiado (g/cm³), ‘ m ’ significa a massa do material ensaiado (g) e ‘ v ’ corresponde ao volume deslocado pelo material (é a diferença entre V1 e V2).

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Eq. (1)}$$

Figura 16 – Ensaio de massa específica no frasco de Le Chatelier.



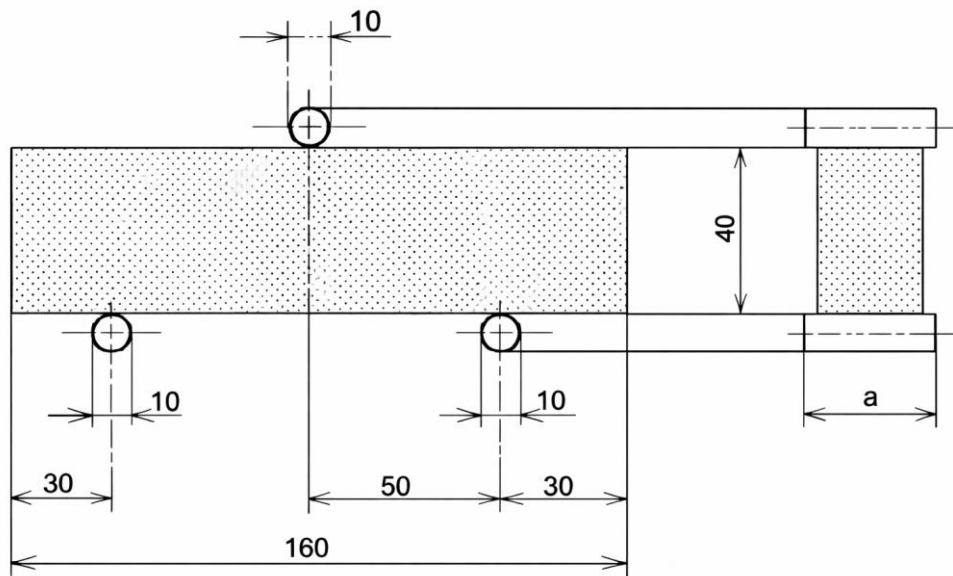
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.3.5. Resistência Mecânica à Tração

Utilizando os corpos de prova moldados nas dimensões 4cm x 4cm x 16cm, realizou-se ensaios de resistência à tração na flexão para cada um dos traços descritos. Os corpos de prova tiveram suas dimensões medidas para a verificação de ocorrência de dilatação/retração e marcados como deveriam ser posicionados na prensa.

A prensa utilizada na realização dos ensaios foi o modelo 2iMUniqueC da InterMetric, no Laboratório do Grupo ATIVE. O teste seguiu a Norma NBR13279 (2005), utilizando três apoios, conforme ilustrado pela Figura 17 (dimensões em milímetros). Os resultados obtidos foram computados pela prensa através de seu computador e salvos para futura análise. A Figura 18 mostra o equipamento com o corpo de prova devidamente posicionado para o início do ensaio.

Figura 17 – Representação do corpo de prova e apoios.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 18 – Corpo de prova durante ensaio de resistência à tração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.3.6. Resistência Mecânica à Compressão

Após o ensaio de tração, em que os corpos de prova rompidos são divididos ao meio devido à força de flexão aplicada nos três pontos, estes foram submetidos aos testes de compressão. Foi utilizada a mesma prensa anteriormente descrita, com a diferença de que seus apoios foram trocados e os corpos de prova posicionados conforme a norma do ensaio. Finalizado o ensaio e ruptura do material, os resultados fornecidos também foram salvos para futura análise. A Figura 19 mostra a prensa equipada com os apoios superiores e inferiores próprios para o teste de compressão.

Figura 19 – Equipamento preparado para iniciar ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.3.7. Absorção de Água

O ensaio de absorção de água se baseou na norma NBR8492. Foram selecionados 3 corpos de prova de cada traço para serem testados. Primeiramente, deixados em estufa por 24 horas na

temperatura de 100°C. Ao final do tempo, foram pesados e obtidos os valores de massa (m_1) de cada amostra.

Então os mesmos corpos de prova foram deixados em temperatura ambiente e submersos em recipiente plástico preenchido com água, onde permaneceram por outras 24 horas. Após o período, foram retirados do recipiente e removeu-se o excesso de umidade sendo enxugados com pano úmido a superfície de cada um e novamente pesados, obtendo novos valores de massa (m_2). A Equação 2 é a utilizada para obtenção da porcentagem de absorção de água.

$$Absorção = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad \text{Eq. (2)}$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)

A Espectrometria por Fluorescência de Raios X é uma técnica não destrutiva que permite identificar os elementos químicos presentes em uma amostra (análise qualitativa) assim como estabelecer a proporção (análise quantitativa) em que cada elemento se encontra presente na amostra (OYEDOTUN, 2018). A Tabela 3 mostra a composição do resíduo de mármore. Observa-se que os principais componentes são o óxido de cálcio (CaO), com 29,9%, e o óxido de magnésio (MgO), com 21,7%. O dióxido de silício (SiO₂) aparece em menor proporção, com 6,2%, enquanto o óxido de alumínio (Al₂O₃) representa apenas 0,5%, outros elementos correspondem a 0,2%.

A perda ao fogo, representada por LOI (*Loss On Ignition*) corresponde a 40,28%. Esse alto índice aconteceu pois o mármore contém alta quantidade de óxidos de carbono em sua estrutura molecular. O dióxido de carbono é liberado como gás, causando grande perda de massa (LIU *et al.*, 2022).

Tabela 3 – FRX do resíduo de mármore.

CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Outros	LOI
29,9	21,7	6,2	0,5	-	-	0,2	40,28

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Já a Tabela 4 apresenta a composição do resíduo de ardósia, que possui perfil químico distinto. O principal componente é o dióxido de silício (SiO₂), com 59,4%, evidenciando caráter predominantemente silicoso. Em seguida, destacam-se o óxido de alumínio (Al₂O₃), com 20,0%, e o óxido de ferro (Fe₂O₃), com 6,4%. Também estão presentes óxidos alcalinos como Na₂O (3,2%) e K₂O (3,7%), além de MgO (3,6%) e CaO (2,2%). Compostos em menores teores incluem TiO₂ (0,7%) e P₂O₅ (0,1%). Sua perda ao fogo foi de apenas 0,77%.

Tabela 4 – FRX do resíduo de ardósia.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI
59,4	20,0	6,4	3,2	3,7	3,6	2,2	0,7	0,1	0,77

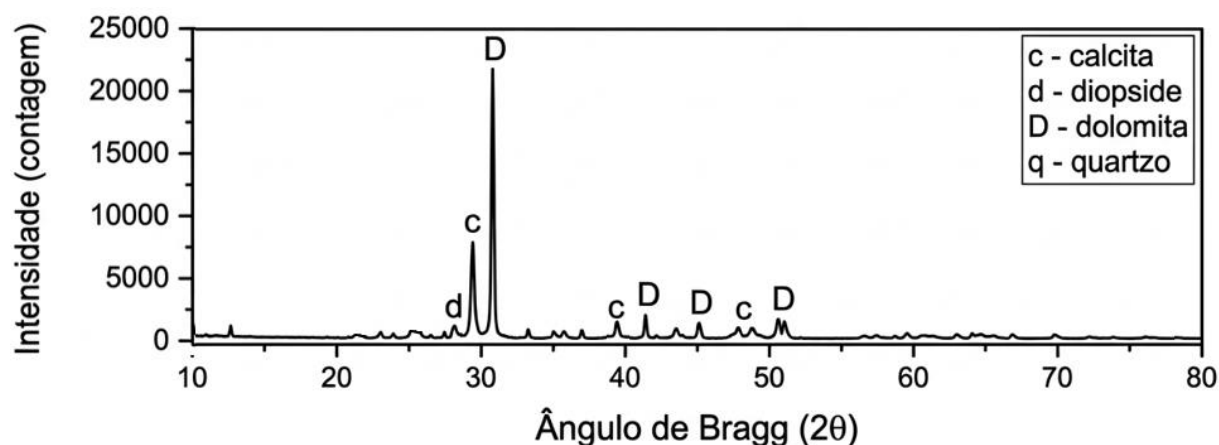
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nota-se que o resíduo de mármore é mais rico em CaO e MgO, enquanto o resíduo de ardósia apresenta maior teor de SiO₂ e Al₂O₃, refletindo diferenças mineralógicas significativas entre os dois materiais. Verifica-se uma grande diferença na composição de óxidos de alumina e sílica entre os materiais pesquisados. Enquanto que no mármore, a composição total de aluminossilicatos é de aproximadamente 7%, a ardósia tem aproximadamente 80% de sua composição formada por SiO₂ e Al₂O₃. Este ensaio indica que a ardósia é uma rica fonte dos precursores necessários para geopolímeros e, portanto, com potencial de aplicação de seus resíduos na produção dos compostos. É importante notar que não necessariamente um material rico em aluminossilicatos irá render um bom geopolímero, sendo necessário investigar se esses aluminossilicatos estão na forma reativa ou não.

4.2. DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

O DRX é uma técnica usada para identificar os minerais presentes em uma amostra cristalina. Funciona com base na interação dos raios X com os planos atômicos dos cristais: quando o feixe incide sobre a amostra, ocorre difração segundo a Lei de Bragg, gerando um padrão de picos característicos (SILVA, 2020). O Gráfico 1 apresenta picos intensos de dolomita (CaMg(CO₃)₂) e picos de calcita (CaCO₃). Tais fases são as mesmas encontradas na literatura, sendo identificadas também nas pesquisas de Lopes *et al.* (2024) e Sharma *et al.* (2022).

Gráfico 1 – DRX do resíduo de mármore.

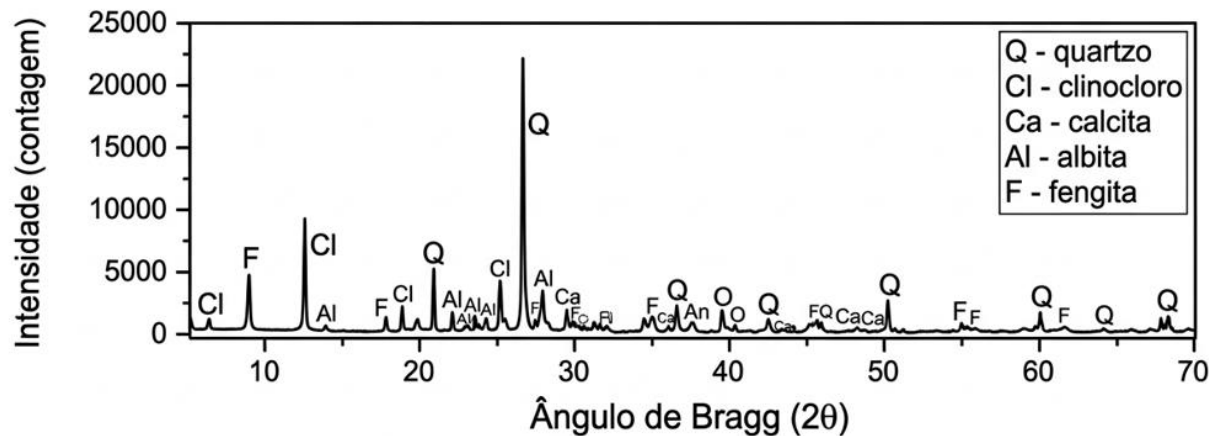


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O difratograma visualizado no Gráfico 2 apresenta principalmente picos de quartzo (SiO₂), além de outras estruturas cristalinas, como clorita ((MgAl)₆(SiAl)₄O₁₀(OH)₈). Os resultados

obtidos estão de acordo com a revisão bibliográfica, visto que os trabalhos de Beltrán *et al.* (2024) e Fuscaldi *et al.* (2022) demonstram resultados semelhantes.

Gráfico 2 – DRX do resíduo de ardósia.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.3. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

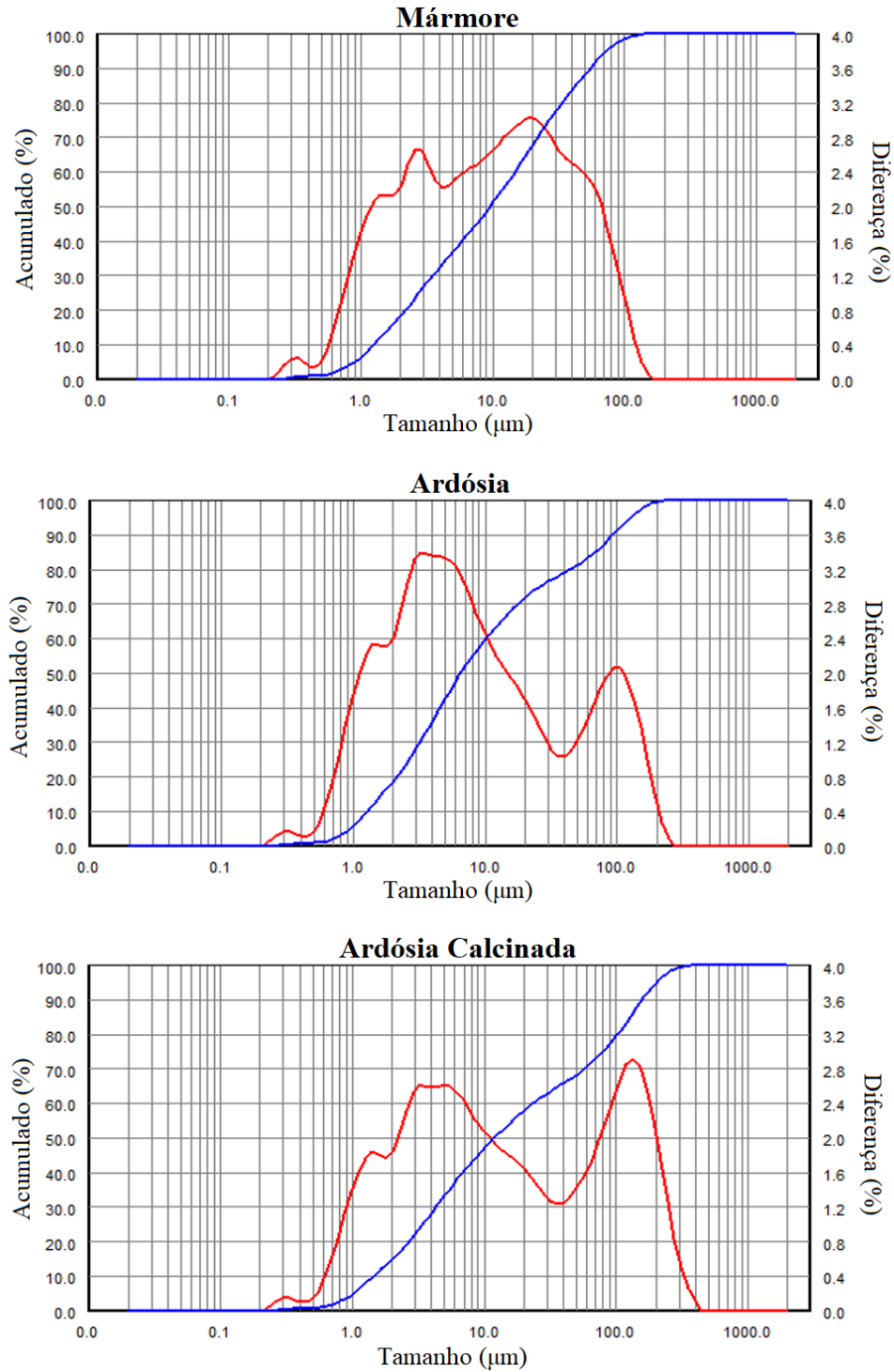
Segundo Lage e Moretti (2025) o tamanho das partículas influencia as propriedades dos geopolímeros. Partículas menores possuem área superficial maior, sendo mais reativas se comparadas com partículas maiores. Isso torna as partículas menores mais rápidas na reação com o ativador alcalino, o que favorece a geopolimerização. Além disso, partículas menores e mais finas podem favorecer a formação de uma microestrutura mais densa e menos porosa devido ao maior preenchimento de vazios, o que pode aumentar a resistência mecânica e durabilidade do material (Lage e Moretti, 2025).

Os resultados das análises de distribuição granulométricas do resíduo de mármore, resíduo de ardósia e resíduo de ardósia calcinada são apresentados pela Tabela 5. A descrição D (50) representa o tamanho mediano das partículas, no qual 50% das partículas da amostra estão acima e 50% abaixo deste valor. A descrição D (10) indica que 10% das partículas tem no máximo aquele valor registrado e 90% delas são maiores. A descrição D (90) mostra o tamanho máximo de 90% das partículas, enquanto que 10% delas serão maiores que o valor listado.

De acordo com Komnitsas *et al.* (2015), quando frações mais finas que 150 μm e D (50) menor que 15 μm são utilizadas, os geopolímeros tendem a melhorar seus resultados nos ensaios de propriedades mecânicas. O autor observou que resistência à compressão aumentou de 38 MPa

para 58 MPa quando o tamanho da partícula foi reduzido de 477 μm para 140 μm . Para o presente trabalho, todos os materiais usados como precursores (mármore, ardósia e ardósia calcinada) apresentaram essas características.

Gráfico 3 – Distribuição granulométrica dos resíduos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 5 – Distribuição granulométrica dos resíduos.

Proporção (%)	Mármore	Ardósia	Ardósia Calcificada
D (10)	1,26 μm	1,29 μm	1,50 μm
D (50)	9,61 μm	6,58 μm	11,95 μm
D (90)	55,07 μm	94,25 μm	157,9 μm

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Observando o Gráfico 3 e a Tabela 5, constata-se que as partículas do resíduo de ardósia calcificada têm praticamente o dobro do tamanho médio das partículas da ardósia não calcificada, 11,95 μm e 6,58 μm , respectivamente. Isso aconteceu devido ao tratamento térmico de calcificação, que aumenta o tamanho médio dos grãos do material devido ao efeito de aglomeração pela fusão das partículas (FUSCALDI *et al.*, 2022). Em seu trabalho, Fuscaldi *et al.* (2022) pesquisou sobre a ardósia e a ardósia calcificada a 1000°C por 5 horas. O material antes do processo de calcificação tinha D (50) de 9,86 μm , e depois do tratamento térmico, o resultado foi de 56,58 μm .

4.4. MASSA ESPECÍFICA

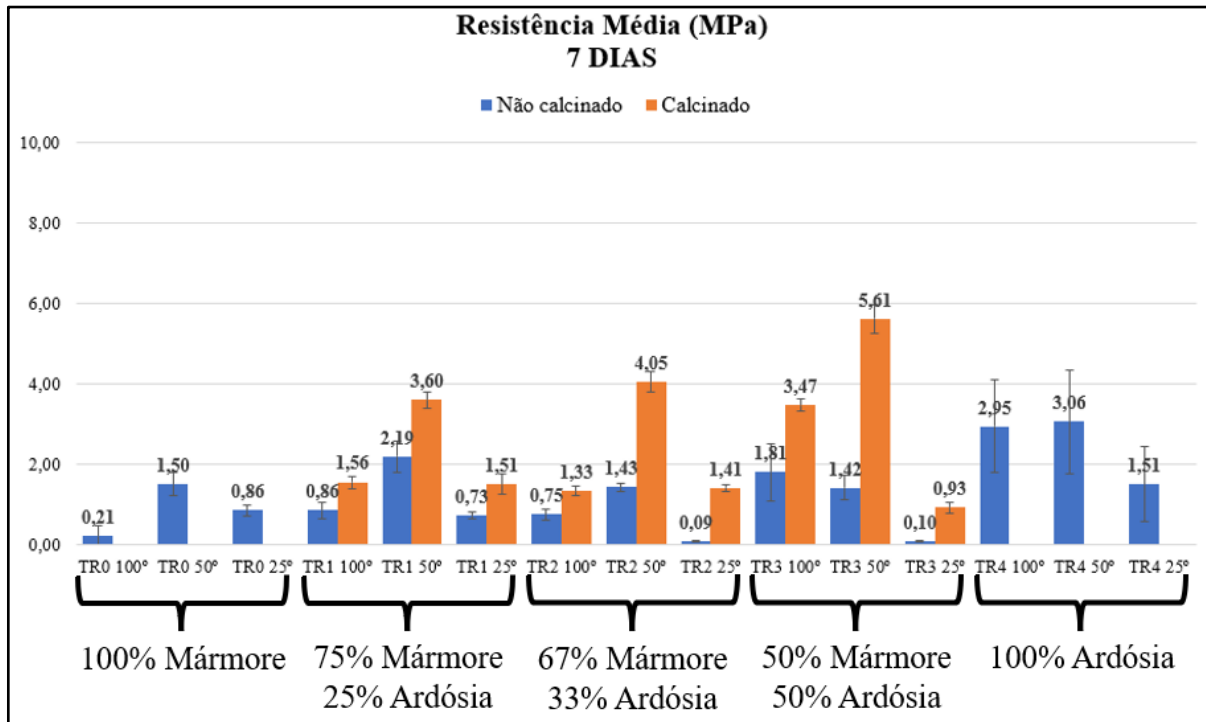
A massa específica, chamada também de densidade é uma propriedade física fundamental que indica a quantidade de massa por unidade de volume de um material. O resultado obtido da massa específica do mármore foi de 2,821 g/cm³ e 2,711 g/cm³ para a ardósia, condizentes com o observado na revisão bibliográfica. Não foi realizado o ensaio de massa específica da ardósia calcificada porque não foi observado variação significativa em relação a ardósia *in natura*, como mostra o resultado de Fuscaldi *et al.*, (2022).

O ensaio de massa específica é fundamental na caracterização de materiais porque determina a relação entre massa e volume real do material (sem considerar vazios). No contexto da construção civil, esse parâmetro é importante para cálculo de dosagens de materiais em traços de concretos e argamassas, e isso também se aplica na produção de geopolímeros.

4.5. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

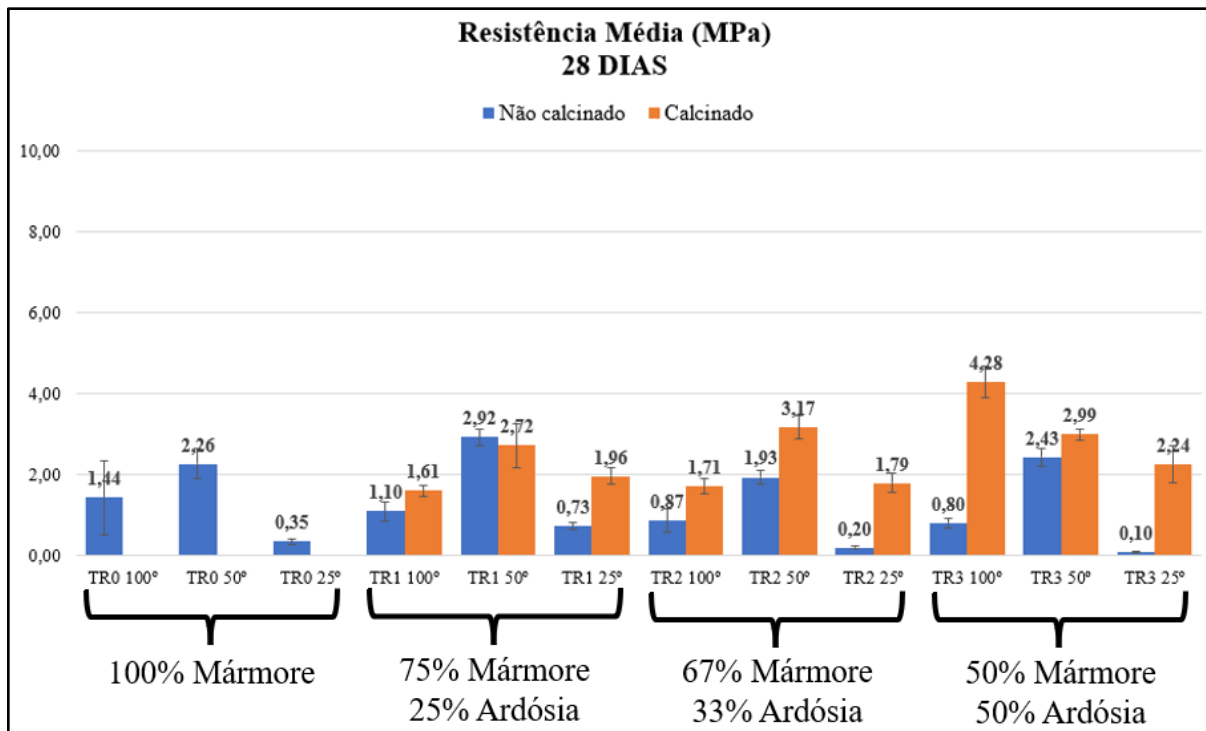
Foram conduzidos ensaios de resistência à tração nos protótipos produzidos. Os resultados são apresentados nos Gráficos (4 e 5) a seguir:

Gráfico 4 – Resistência à tração (7 dias).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Gráfico 5 – Resistência à tração (28 dias).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

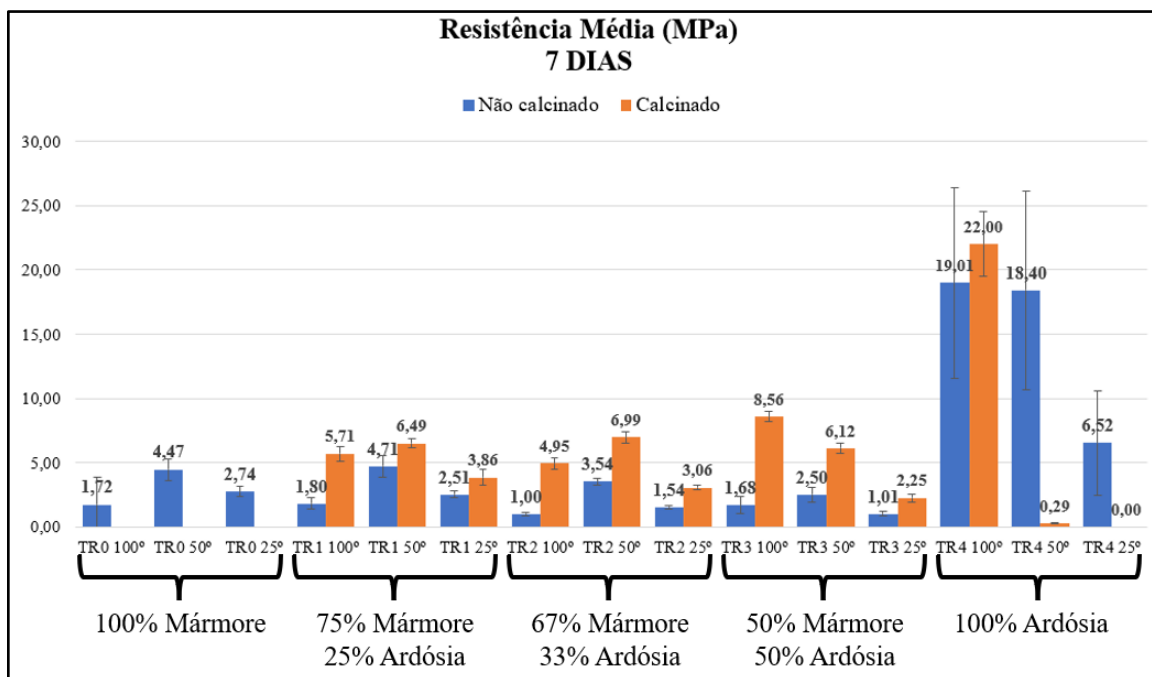
Neste ensaio também foi notório a influência positiva da calcinação dentro do processo de beneficiamento da ardósia para o ganho de resistência. Com exceção de apenas um traço, em que a resistência ficou ligeiramente abaixo do traço não calcinado, todos os demais corpos de prova tiveram resultados superiores, e em alguns casos aumentando em cerca de quatro vezes a resistência obtida devido ao tratamento térmico.

A temperatura de cura, assim como no ensaio de compressão, também favoreceu um melhor desempenho neste teste. Todos os compostos curados em 100°C ou 50°C foram superiores quando comparados com aqueles de 25°C. Destaca-se também que, comparando apenas as duas temperaturas maiores, os protótipos de 50°C apresentaram, em sua maioria, resultados melhores que os semelhantes de 100°C. Diferentemente do ensaio de resistência à compressão, não se obteve diferenças significativas na variação do tempo de cura, sendo que em alguns traços, o tempo de 7 dias foi até mesmo mais resistente se comparado com os traços curados com 28 dias antes do rompimento.

4.6. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

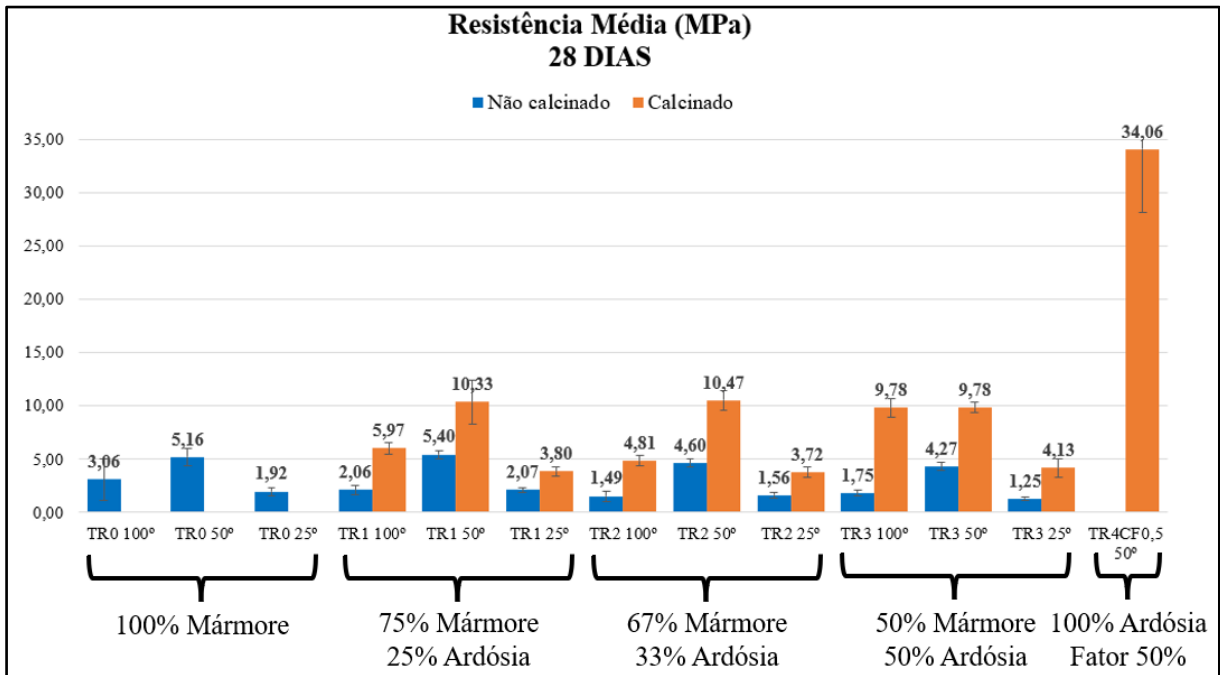
Foram conduzidos ensaios de resistência à compressão nos protótipos produzidos. Os resultados são apresentados nos Gráficos (6 e 7) a seguir:

Gráfico 6 – Resistência à compressão (7 dias).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Gráfico 7 – Resistência à compressão (28 dias).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise dos gráficos permite concluir que a calcinação proporciona uma melhora significativa na resistência mecânica dos protótipos testados. Todos os corpos de prova que passaram pelo tratamento térmico obtiveram resultados superiores se comparados com aqueles não calcinados. Isso ocorre, pois, a calcinação aumenta a reatividade da ardósia com o hidróxido de sódio, favorecendo as características pozolânicas da ardósia. Em geral, todos os traços analisados dobraram de resistência devido ao procedimento térmico.

O aumento na temperatura de cura também surtiu um efeito positivo: compostos curados à 50°C e 100°C foram mais resistentes do que os de mesmo traço, mas que tiveram cura em 25°C. Os gráficos indicam que os traços foram em média mais de duas vezes mais resistentes, como o TR1C, que teve um ganho de 171,8% de resistência na comparação entre as temperaturas de 25°C e 50°C aos 28 dias.

Outro fator que propiciou ganho de resistência mecânica foi o tempo de cura. Em geral, grande parte dos traços apresentaram desempenho superior no ensaio com 28 dias de cura em relação aos ensaiados com apenas 7 dias. Aziz *et al.* (2023) em seu trabalho que investigou o tempo de cura estendido, afirma que o geopolímero se densifica ao longo do tempo, diminuindo sua porosidade total.

Os traços com melhores desempenhos foram aqueles em que se tinha alguma quantidade de ardósia em sua proporção (TR1, TR2, TR3 e TR4). O TR0, composto exclusivamente por mármore foi de menor resistência, enquanto que o TR4, elaborado somente com ardósia, foi o que teve melhor avaliação. Estes resultados podem ser explicados devido à ardósia ser uma rica fonte de aluminossilicatos, diferentemente do mármore, o que favorece a geopolimerização daquele em comparação ao último.

Estes resultados indicam desempenho satisfatório e um grande potencial, comparado ao concreto convencional. Usado em obras civis, em que a resistência ao mesmo ensaio se situa geralmente entre 20 MPa e 40MPa, e elementos estruturais comuns, como lajes, vigas e pilares que utilizam frequentemente concretos de 25 MPa a 30 MPa de resistência, alguns dos protótipos testados ficam próximos: 18 MPa, 19MPa, 22MPa e até 34MPa. Outros traços, na faixa de 10 MPa, podem surgir como alternativas em sistemas não estruturais ou de solicitações de carregamentos baixas, como alvenarias de vedação e passeios.

4.7. ABSORÇÃO DE ÁGUA

A avaliação da absorção de água de cada traço conforme a norma NBR 8492. Este ensaio é utilizado para determinar a capacidade do material testado de absorver água do meio em que está presente, propriedade crucial em materiais de construção, devido a sua influência no comportamento do produto na presença de água. Este ensaio pode ainda, de maneira indireta, avaliar a porosidade do material. Isso acontece porque a água penetra e ocupa os poros permeáveis (abertos) do material. Observou-se que o TR3, traço cuja composição é constituída por 50% de mármore e 50% de ardósia, foi o único que apresentou desintegração. Os resultados completos são apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 – Absorção de água de cada traço.

TRAÇO	MASSA INICIAL (g)	MASSA FINAL (g)	ABSORÇÃO (%)
TR 100°	107,73	125,37	16,37%
TR1 100°	77,85	91,89	18,03%
TR2 100°	85,24	95,96	12,58%
TR3 100°	80,51	DESMANCHOU	-
TR 50°	107,88	126,13	16,92%
TR1 50°	83,2	94,58	13,68%
TR2 50°	98,08	113,42	15,64%
TR3 50°	75,18	86,37	14,88%
TR 25°	112,04	115,34	2,95%
TR1 25°	109,24	113,48	3,88%
TR2 25°	102,62	107,25	4,51%
TR3 25°	118,47	DESMANCHOU	-
TR1-C 100°	83,02	97,7	17,68%
TR2-C 100°	79,64	94,97	19,25%
TR3-C 100°	91,15	DESMANCHOU	-
TR1-C 50°	74,1	85,62	15,55%
TR2-C 50°	108,08	127,04	17,54%
TR3-C 50°	88,37	104,38	18,12%
TR1-C 25°	109,95	115,09	4,67%
TR2-C 25°	96,27	100,67	4,57%
TR3-C 25°	118,61	121,25	2,23%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nota-se que os traços com menores índices de absorção foram aqueles curados na menor temperatura dentre as testadas: 25°C. Tal resultado pode indicar uma desidratação microestrutural do geopolímero em temperaturas maiores, como 50°C e 100°C, gerando mais espaços vazios devido a evaporação da água. A norma NBR 8492 estabelece que as amostras ensaiadas não podem gerar um resultado de absorção de água maior que 20%. Por isso pode-se afirmar que todos os traços testados, com a exceção daqueles que desmancharam, apresentaram resultados satisfatórios. Mesmo aqueles que foram curados em temperaturas mais elevadas (50°C e 100°C), obtiveram índices inferiores a 20%, sugerindo resultados promissores.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos ao longo deste estudo evidenciam a viabilidade do desenvolvimento de matrizes geopoliméricas com a incorporação de resíduos de rochas ornamentais, como o mármore e a ardósia. A utilização desses materiais como insumos alternativos contribui para a redução de impactos ambientais associados ao descarte inadequado, além de promover soluções sustentáveis e inovadoras para o setor de materiais da construção civil.

O traço composto por 100% de resíduo de ardósia calcinada destacou-se por apresentar os maiores valores médios de resistência à compressão, atingindo 22MPa no protótipo com 60% de ativador alcalino submetido à 7 dias de cura térmica a 100°C e 34 MPa no protótipo com 50% de ativador alcalino aos 28 dias de cura a 50°C. Estes resultados são comparáveis ao do concreto convencional utilizado em elementos estruturais, que apresentam uma resistência média entre 25 MPa e 30 MPa.

Por outro lado, quando se utilizou os dois resíduos em conjunto para a produção dos corpos de prova, os resultados foram muito semelhantes entre os traços, especialmente na cura por 28 dias a 50°C: 10,33 MPa (TR1C), 10,47 MPa (TR2C) e 9,78 MPa (TR3C). No ensaio de resistência à tração, estes mesmos traços apresentaram resistências de 3,60 MPa, 4,05 MPa e 5,61 MPa, respectivamente, aos 7 dias de cura. Se comparado ao concreto comum, feito com cimento Portland, agregados naturais e sem adição de fibras, o geopolímero foi mais resistente, tendo como base que o concreto suporta, em média, 2,0 a 3,5 MPa no ensaio de tração direta.

Sendo assim, conclui-se que os investimentos em pesquisas sobre reutilização de rejeitos são fundamentais para a cadeia produtiva dos insumos em questão, tendo em vista a necessidade de descarte adequado de cada material e o possível reuso, diminuindo o volume gerado de resíduos e ao mesmo tempo contribuindo para a não utilização de materiais convencionais, muitos dos quais podem ser grandes emissores de gases poluentes em sua produção, como o cimento Portland.

Considerando os impactos ambientais causados pela possibilidade de descarte inadequado dos insumos utilizados como materiais nessa pesquisa, pode-se afirmar que os protótipos produzidos apresentaram boas perspectivas de uso futuro, devido às suas características apresentadas e também pelos resultados dos ensaios laboratoriais apresentados.

Ainda, é importante ressaltar que novas pesquisas acerca do tema devem ser conduzidas, visando a potencialização destes resultados e uma melhora geral do produto final, bem como explorar soluções e métodos distintos dos utilizados.

5.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho apresentado produziu geopolímeros exclusivamente com ardósia e mármore. Entre diversos tipos de rochas ornamentais possíveis, é interessante avaliar a possibilidade de produção de novas pesquisas utilizando granitos e quartzitos, que podem apresentar alto teor de sílica e conseqüentemente promissoras fontes de precursores para produção de protótipos. A partir disso, explorar novas possibilidades combinando diferentes proporções de cada um dos materiais citados e verificar novos traços a serem pesquisados e as melhores propriedades de cada um.

No que se refere ao uso da ardósia calcinada, seria pertinente aprofundar a investigação por meio de ensaios microestruturais adicionais, considerando que o geopolímero produzido com esse material apresentou os melhores resultados de resistência mecânica, tanto à compressão quanto à tração. A partir dessa análise, torna-se igualmente relevante avaliar a viabilidade da aplicação do processo de calcinação, buscando determinar em que medida o tratamento térmico contribui para o aprimoramento das propriedades mecânicas. Tal avaliação é fundamental, visto que se trata de um procedimento com demanda energética significativa, sendo necessário verificar se o ganho de desempenho obtido justifica o consumo energético envolvido.

Outro ponto de destaque para investigação futura é a possibilidade de produção de geopolímeros utilizando diferentes ativadores alcalinos e variações de proporção. Neste trabalho foi utilizado apenas o hidróxido de sódio, entretanto a literatura apresenta outras possibilidades não exploradas pelo autor: hidróxido de potássio, silicato de sódio ou silicato de potássio. Tais ativadores podem render uma grande variabilidade de traços diferentes para pesquisa, variando a combinação entre cada um deles e a proporção utilizada para cada protótipo.

A combinação de diferentes ativadores com diferentes fontes de precursores por si só já renderia um novo trabalho de pesquisa muito amplo, mas ainda é possível explorar outras variáveis e analisar como elas influenciariam nos resultados: modificar a metodologia de moldagem, utilizando outros protocolos (diferentes equipamentos, processos, tempos), além de testar

temperaturas de curas diferentes deste trabalho. Todos os fatores citados poderão render diversas possibilidades de pesquisas, gerando novos conteúdos científicos que poderão contribuir para a produção de materiais sustentáveis e eficientes, favorecendo o meio-ambiente e a economia, inovando e trazendo tecnologias para a construção civil e engenharia de materiais.

REFERÊNCIAS

AHMAD, Tehseen et al. **Environmental, Energy, and Water Footprints of Marble Tile Production Chain in a Life Cycle Perspective**. Sustainability, v. 14, n. 14, p. 8325, 7 jul. 2022.

ALLAM, Mostafa E.; AMIN, Shereen K.; GARAS, Gihan. **Testing of cementitious roofing tile specimens using marble waste slurry**. International Journal of Sustainable Engineering, v. 13, n. 2, p. 151–157, 3 mar. 2020.

ALVES, Joner Oliveira; ESPINOSA, Denise Croce Romano; TENÓRIO, Jorge Alberto Soares. **Recovery of Steelmaking Slag and Granite Waste in the Production of Rock Wool**. Materials Research, v. 18, n. 1, p. 204–211, fev. 2015.

ANANDARAJ, S. et al. **An experimental study on Fly Ash (FA) and marble powder in the properties of Self-Compacting Concrete (SCC)**. Materials Today: Proceedings, v. 52, p. 1771–1774, 2022.

ANJUM, Naveed et al. **Petrographic, Mineralogical and Geo-mechanical Characteristics of Marble from Mohmand District, Pakistan: Implications for its Use in Construction Industry**. International Journal of Economic and Environmental Geology, v. 15, n. 1, p. 33–40, 11 out. 2024.

ANTUNES, Marco Antônio Das Graças; GUIMARÃES, Antonio Carlos Rodrigues; MARQUES, Geraldo Luciano De Oliveira. **Uma solução viável para a reciclagem de resíduos industriais de ardósia em pavimentação**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 11, n. 4, p. 236–254, 30 abr. 2020.

ARAÚJO, Cleber S. de; SILVA, Lindomar R. Damasceno da. **Influência da calcinação sobre a remoção de ferro da caulinita e ilita e seus efeitos sobre a acidez**. Química Nova, v. 26, n. 2, p. 161–164, mar. 2003.

ASTARIANI, Ni Kadek et al. **Mechanical Properties and Microstructure of Geopolymer Binder Based on Umeanyar Slatestone Powder**. Civil Engineering and Architecture, v. 9, n. 6, p. 1698–1716, out. 2021.

AZIZ, Ikmal Hakem A. et al. **Mechanical Performance, Microstructure, and Porosity Evolution of Fly Ash Geopolymer after Ten Years of Curing Age**. *Materials*, v. 16, n. 3, p. 1096, 27 jan. 2023.

BARBOSA, Karla Suellen Lino et al. **Efeito da adição do resíduo de mármore e granito com fibras de sisal nas propriedades de compósitos poliméricos**. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 2, p. 7653–7667, 2020.

BEZERRA, Wendell Bruno Almeida et al. **Effect of the Incorporation of Marble Waste in the Properties of Clay Ceramic Bricks**. *Materials Science Forum*, v. 1012, p. 250–255, out. 2020.

CARDENES, V.; CNUUDE, V.; CNUUDE, J. P. **Iberian roofing slate as a Global Heritage Stone Province Resource**. *Episodes*, v. 38, n. 2, p. 97–105, 1 jun. 2015.

CARRILLO BELTRÁN, Raúl et al. **Towards a Sustainable Mining: Reuse of Slate Stone Cutting Sludges for New Geopolymer Binders**. *Sustainability*, v. 16, n. 8, p. 3322, 16 abr. 2024.

CARVALHO, Giovanna M. X. de et al. **Obtenção de compósitos de resíduos de ardósia e polipropileno**. *Polímeros*, v. 17, n. 2, p. 98–103, jun. 2007.

ÇELIK, Ali İhsan. **Mechanical Performance of Geopolymer Concrete Based on Basalt and Marble Powder**. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, v. 47, n. 4, p. 2173–2187, ago. 2023.

CITAK, Hakan et al. **Comprehensive Review of Studies on Metamorphic Rocks**. *International Journal of Geosciences*, v. 14, n. 10, p. 999–1035, 2023.

EKINCI, Enes et al. **The Use of Waste Marble as Fine Aggregate in the Production of Geopolymer Mortar Samples**. 2021.

ERDOGMUS, Ertugrul et al. **Recycling of marble cutting waste additives in fired clay brick structure: a statistical approach to process parameters**. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 47, p. 71936–71947, out. 2022.

FANT, J. Clayton. **Rome's marble yards**. *Journal of Roman Archaeology*, v. 14, p. 167–198, 2001.

FIRDOUS, Rafia; STEPHAN, Dietmar; DJOBO, Jean Noël Yankwa. **Natural pozzolan based geopolymers: A review on mechanical, microstructural and durability characteristics**. *Construction and Building Materials*, v. 190, p. 1251–1263, nov. 2018.

FUSCALDI, Filipe Miranda et al. **Estudo da influência do tratamento termomecânico nas propriedades do resíduo de ardósia**. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 27, n. 4, p. e20220248, 2022.

JOPE, E. M.; DUNNING, G. C. **The use of blue slate for roofing in medieval England**. *The Antiquaries Journal*, v. 34, n. 3–4, p. 209–217, out. 1954.

KANG, Xin et al. **Sustainable eco-friendly bricks from slate tailings through geopolymerization: synthesis and characterization analysis**. *Construction and Building Materials*, v. 278, p. 122337, abr. 2021.

KAPLAN, Gökhan et al. **The effect of geopolymer slurries with clinker aggregates and marble waste powder on embodied energy and high-temperature resistance in prepacked concrete: ANFIS-based prediction model**. *Journal of Building Engineering*, v. 67, p. 105987, maio 2023.

KOMNITSAS, Kostas et al. **Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers**. *Advanced Powder Technology*, v. 26, n. 2, p. 368–376, mar. 2015.

KORE, Sudarshan D.; VYAS, A. K.; KABEER K. I., Syed Ahmed. **A brief review on sustainable utilisation of marble waste in concrete**. *International Journal of Sustainable Engineering*, v. 13, n. 4, p. 264–279, 3 jul. 2020.

LAGE, Izabelly Thaynara Miranda; MORETTI, Juliana Petermann. **Valorização de resíduos como matéria prima na síntese de geopolímeros aplicáveis à construção civil**. *Ambiente Construído*, v. 25, p. e142024, 2025.

LEE, Wei-Hao et al. **Sustainable Development and Performance Evaluation of Marble-Waste-Based Geopolymer Concrete**. *Polymers*, v. 12, n. 9, p. 1924, 26 ago. 2020.

LEZZERINI, Marco et al. **Effect of Marble Waste Powder as a Binder Replacement on the Mechanical Resistance of Cement Mortars**. Applied Sciences, v. 12, n. 9, p. 4481, 28 abr. 2022.

LIU, Chuanjiang; HAN, Kenan; WANG, DuoJun. **An In Situ Decarbonation Kinetic Study of Calcite Using Synchrotron Radiation XRD**. The Canadian Mineralogist, v. 60, n. 4, p. 687–698, 1 jul. 2022.

LOPES, Marcia Maria Salgado et al. **Optimization of performance of building paints using granite and marble waste**. Ambiente Construído, v. 24, p. e136181, dez. 2024.

MAHTO, Shiva Kumar; SINHA, Sanjeev. **Application of marble dust and ground granulated blast-furnace slag in emulsified asphalt warm mixtures**. Journal of Cleaner Production, v. 370, p. 133532, out. 2022.

MARQUES, Marcos Vinícius Dias; SANTOS, Rodrigo Rodrigues dos; CRUZ, Cláudia Patrícia Torres. **O Panorama dos Resíduos de Corte de Mármore e Granito no Cenário Atual da Construção Civil**. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 3, p. 26800–26811, 2021.

MARRAS, Graziella et al. **Circular economy in marble industry: From stone scraps to sustainable water-based paints**. Construction and Building Materials, v. 325, p. 126768, mar. 2022.

MARVILA, Markssuel T. et al. **Circular economy in cementitious ceramics: Replacement of hydrated lime with a stoichiometric balanced combination of clay and marble waste**. International Journal of Applied Ceramic Technology, v. 18, n. 1, p. 192–202, jan. 2021.

MATSIMBE, Jabulani et al. **Geopolymer: A Systematic Review of Methodologies**. Materials, v. 15, n. 19, p. 6852, 2 out. 2022.

MEDEIROS, Winícius Rodrigues Pereira de et al. **Utilizing marble and granite industry waste in asphalt mixtures for enhanced road performance and sustainability**. Journal of Engineering Research, v. 12, n. 4, p. 670–679, dez. 2024.

MENDES, Gabriela Azambuja; EFFTING, Carmeane; SCHACKOW, Adilson. **Argamassa autonivelante com adição de resíduos de mármore e granitos: propriedades físicas e mecânicas**. Ambiente Construído, v. 20, n. 3, p. 403–418, jul. 2020.

MORENO, Armando Nicolás et al. **Resíduos de mármore em materiais para a construção: uma revisão do uso do pó de mármore em argamassas, concretos e tijolos.** Revista ALCONPAT, v. 12, n. 2, p. 162–183, 1 maio 2022.

MOURA, Hellen Regina de Carvalho Veloso. **Influência dos aditivos biocidas e dispersantes no desempenho e na durabilidade de tintas látex produzidas com resíduo de granito.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2023.

OYEDOTUN, Temitope D. Timothy. **X-ray fluorescence (XRF) in the investigation of the composition of earth materials: a review and an overview.** Geology, Ecology, and Landscapes, v. 2, n. 2, p. 148–154, 3 abr. 2018.

PARADELO, R.; MOLDES, A. B.; BARRAL, M. T. **Characterization of slate processing fines according to parameters of relevance for mine spoil reclamation.** Applied Clay Science, v. 41, n. 3–4, p. 172–180, out. 2008.

PATIL, Smita Sambhaji et al. **Limestone Calcined Clay Cement as A Green Construction Material.** ASEAN Journal of Science and Engineering, v. 2, n. 2, p. 157–166, 19 ago. 2021.

PEREIRA, Mara Monaliza Linhares; CAPUZZO, Valdirene Maria Silva; LAMEIRAS, Rodrigo de Melo. **Evaluation of use of marble and granite cutting waste to the production of self-compacting concrete.** Construction and Building Materials, v. 345, p. 128261, ago. 2022.

PROŠEK, Z.; NEŽERKA, V.; TESÁREK, P. **Enhancing cementitious pastes with waste marble sludge.** Construction and Building Materials, v. 255, p. 119372, set. 2020.

PROVIS, John L. **Alkali-activated materials.** Cement and Concrete Research, v. 114, p. 40–48, dez. 2018.

RAMOS, João Carlos R.; PASSALINI, Pedro G. S.; HOLANDA, José Nilson F. **Utilization of marble waste as a sustainable replacement for calcareous in the manufacture of red-firing wall tiles.** Construction and Building Materials, v. 377, p. 131115, maio 2023.

ROSA, Maurício Pessoa et al. **Viabilidade na reutilização da ardósia em substituição do agregado graúdo na dosagem do concreto.** Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 1, p. 936–948, 2020.

SANTOS, I. F. et al. **Reciclagem de resíduo de mármore e granito em matrizes poliméricas**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2015, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: Editora Edgard Blücher, 2015.

SANTOS, Tatiane; GONÇALVES, Jardel P.; ANDRADE, Heloysa M. C. **Partial replacement of cement with granular marble residue: effects on the properties of cement pastes and reduction of CO₂ emission**. SN Applied Sciences, v. 2, n. 9, p. 1605, set. 2020.

SANTOS, Vinicius Rodrigues dos et al. **Experimental study of the production of resin granite and marble using their solid waste**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 29, n. 1, p. e20230353, 2024.

SAVAZZINI-REIS, Alessandra et al. **Análise do aproveitamento de resíduo de rochas ornamentais em bloco prensado**. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 74., 2019, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: Editora Blucher, 2019.

SHARMA, Tarun et al. **Studies on the Utilization of Marble Dust, Bagasse Ash, and Paddy Straw Wastes to Improve the Mechanical Characteristics of Unfired Soil Blocks**. Sustainability, v. 14, n. 21, p. 14522, 4 nov. 2022.

SHARMA, Tarun; SINGH, Sandeep. **Influence of marble dust, bagasse ash and paddy straw fibers on the density and optimum water content of unfired soil block**. Materials Today: Proceedings, v. 51, p. 965–971, 2022.

SILVA, Igor Moreira da et al. **Caracterização tecnológica do mármore dolomítico de Acarape-CE para uso como rocha ornamental**. Estudos Geológicos, v. 34, n. 1, p. 03–21, 25 out. 2024.

SILVA, J. B. et al. **Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas**. Cerâmica, v. 51, n. 320, p. 325–330, dez. 2005.

SILVA, Renato F. da. **A Difração de Raios X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais**. Revista Processos Químicos, v. 14, n. 27, p. 73–82, 22 set. 2020.

SILVESTRO, Laura; SCOCZYNSKI, Rodrigo; NAVARRETE, Iván. **Advancements in low carbon emission cements for 3D printing a state-of-the-art review**. Revista Ingeniería de Construcción, v. 39, p. 1–10, 2024.

SINGH, N. B.; MIDDENDORF, B. **Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview**. *Construction and Building Materials*, v. 237, p. 117455, mar. 2020.

SUFIAN, Muhammad et al. **An Experimental and Empirical Study on the Use of Waste Marble Powder in Construction Material**. *Materials*, v. 14, n. 14, p. 3829, 8 jul. 2021.

TAZZINI, Antonio et al. **Managing Marble Quarry Waste: Opportunities and Challenges for Circular Economy Implementation**. *Sustainability*, v. 16, n. 7, p. 3056, 6 abr. 2024.

VAN DEVENTER, Jannie S. J. et al. **Chemical Research and Climate Change as Drivers in the Commercial Adoption of Alkali Activated Materials**. *Waste and Biomass Valorization*, v. 1, n. 1, p. 145–155, mar. 2010.

WANG, Qing et al. **Research on Mechanical Properties of Geopolymer Concrete under early Stage Curing System**. *Applied Mechanics and Materials*, v. 164, p. 492–496, abr. 2012.

WIEDEMANN, Adenísio; FRANCISCO, Rodrigo Catafesta; SILVA, Joel Dias da. **Aproveitamento de resíduos pétreos de marmorarias: uma abordagem teórica**. 2015.