



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



ANA LAURA RODRIGUES DE AGUIAR XAVIER

Investigação De Propriedades De Argamassas Produzidas A Partir De Cimentos  
Compostos Com Resíduos De Mármore Branco Dolomítico.

OURO PRETO

Agosto 2025

Ana Laura Rodrigues de Aguiar Xavier

Investigação de propriedades de argamassas produzidas a  
partir de cimentos compostos com resíduos de mármore  
branco dolomítico.

Trabalho Final de Curso apresentado como  
parte dos requisitos para obtenção do título de  
Bacharela em Engenharia Civil na  
Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini  
Silva

Coorientador: Prof. Me. Christopher Antônio  
Martins de Moura

OURO PRETO

Agosto 2025

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

X3i Xavier, Ana Laura Rodrigues de Aguiar.  
Investigação de propriedades de argamassas produzidas a partir de  
cimentos compostos com resíduos de mármore branco dolomítico.  
[manuscrito] / Ana Laura Rodrigues de Aguiar Xavier. - 2025.  
66 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva.  
Coorientador: Me. Cristopher Antônio Martins de Moura.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Mármore. 2. Sustentabilidade. 3. Cimento - Indústria. 4. Resíduos  
industriais. I. Silva, Guilherme Jorge Brigolini. II. Moura, Cristopher  
Antônio Martins de. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 666.945

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



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Ana Laura Rodrigues de Aguiar Xavier

Investigação de propriedades de argamassas produzidas a partir de cimentos compostos com resíduos de mármore branco dolomítico.

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

Aprovada em 28 de agosto de 2025

### Membros da banca

Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto  
Me. Cristopher Antônio Martins de Moura - Coorientador - Universidade Federal do Mato Grosso  
Dr. José Agenor Carvalho Junior - Universidade Federal de Ouro Preto  
Me. Raul Tadeu Lobato Ferreira - Universidade Federal do Mato Grosso

Dr. 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 21/10/2025



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Jorge Brigolini Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/10/2025, às 14:03, 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](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1000614** e o código CRC **7011578E**.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por ter me iluminado e abençoado, me concedendo força, saúde e sabedoria durante o curso.

Aos meus pais, que fazem dos meus sonhos os deles e não medem esforços para realizá-los. Obrigada por me incentivar e me motivar com tanto amor. Também a minha irmã, que está sempre ao meu lado. Ao meu noivo, por nunca soltar minha mão, por estar presente em todos os momentos nunca me deixando desistir. Aos meus amigos, primos e tios, por todo apoio prestado.

Aos meus orientadores, Christopher e Guilherme, sou grata por todos ensinamentos, ajuda, incentivo e orientações. A todos do grupo Ative, pela assistência e incentivo à pesquisa, em especial ao Matheus e José Agenor, pelo suporte com as análises microestruturais, ao Gustavo pelo auxílio técnico no laboratório e ao Nicolas pelo suporte e companheirismo.

À UFOP, pelo suporte acadêmico e ensino de qualidade. Ao CNPq, pelo apoio financeiro que tornou possível a realização dessa pesquisa. E a todos os professores que fizeram parte dessa jornada, por todo conhecimento passado.

## RESUMO

A preocupação com os impactos ambientais da construção civil tem ganhado cada vez mais espaço, especialmente quando se trata da produção de cimento Portland, uma das principais fontes de emissão de CO<sub>2</sub>. Com isso, cresce o interesse por alternativas mais sustentáveis que ajudem a reduzir o uso de recursos naturais e a geração de resíduos. No cenário brasileiro, o resíduo de mármore branco dolomítico é descartado em grandes quantidades pela indústria do beneficiamento de rochas ornamentais, necessitando de alternativas sustentáveis para sua disposição final. Um dos caminhos mais promissores tem sido sua incorporação em compósitos cimentícios, contribuindo não apenas para dar uma nova destinação ao resíduo, mas também para diminuir a dependência de matérias-primas virgens na fabricação de concretos e argamassas. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar o desempenho de argamassas nas quais parte do cimento Portland foi substituída pelo resíduo de mármore branco dolomítico (RMB), proveniente do estado do Espírito Santo, Brasil. Para isso, o RMB passou por etapas de secagem e moagem em moinho de bolas. Em seguida, o material foi caracterizado utilizando técnicas de fluorescência de raios-X (FRX), difração de raios-X (DRX) e análise granulométrica. Foram então formuladas quatro composições de argamassa 1:3:0,48 (cimento: areia: água), variando a substituição do cimento Portland comum (CP) por RMB entre 0% e 35%. Amostras foram submetidas a ensaios de resistência à compressão e absorção por capilaridade aos 7 e 28 dias de cura. Para a análise por micro tomografia de raios-X ( $\mu$ CT), corpos de prova cilíndricos foram extraídos e a hidratação foi interrompida com isopropanol durante 7 dias. Os resultados obtidos por DRX evidenciaram picos intensos associados à dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), o que se mostrou coerente com os dados de FRX, que apontaram alta concentração de cálcio e magnésio. Os dados do ensaio de finura evidenciaram que o tempo de moagem adequado foi de 120 minutos e a análise da granulometria a laser confirmou que o RMB alcançou granulometria mais fina do que o clínquer. As argamassas com RMB apresentaram variações do índice de consistência de -1,50 a 1,03 cm, dispensando a utilização de plastificantes. Observou-se que o índice de desempenho variou entre 98% e 148% após 7 dias de cura e entre 75% e 115% aos 28 dias, quando comparado à argamassa de controle. A absorção por capilaridade aumentou com a elevação teor de substituição. A porosidade volumétrica total, obtida por meio de  $\mu$ CT esteve na faixa de 14% a 22% aos 7 dias e de 13% a 19% após 28 dias. Portanto, conclui-se que o resíduo de mármore dolomítico branco, em teores de substituição entre 15% e 35%, possibilitou a produção de argamassas com consistência, porosidade e resistência à compressão comparáveis às argamassas convencionais.

**Palavras-chaves:** Resíduo de Mármore, Sustentabilidade, Substituição de cimento

## ABSTRACT

The concern about the environmental impacts of the construction industry has been gaining increasing attention, especially regarding the production of Portland cement, one of the main sources of CO<sub>2</sub> emissions. Consequently, interest has grown in more sustainable alternatives that help reduce the use of natural resources and the generation of waste. In the Brazilian context, white dolomitic marble waste is discarded in large quantities by the ornamental stone processing industry, requiring sustainable alternatives for its final disposal. One of the most promising approaches has been its incorporation into cementitious composites, contributing not only to providing a new destination for the waste but also to reducing the dependence on virgin raw materials in the production of concrete and mortar. In this context, the aim of this work is to analyze the performance of mortars in which part of the Portland cement was replaced with white dolomitic marble waste (RMB) from the state of Espírito Santo, Brazil. For this purpose, the RMB underwent drying and grinding in a ball mill. The material was then characterized using X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), and particle size analysis. Four mortar compositions were formulated in the proportion 1:3:0.48 (cement: sand: water), with the replacement of ordinary Portland cement (OPC) by RMB ranging from 0% to 35%. Samples were subjected to compressive strength and capillary water absorption tests at 7 and 28 days of curing. For X-ray microtomography ( $\mu$ CT) analysis, cylindrical specimens were extracted and hydration was stopped with isopropanol for 7 days. The XRD results revealed intense peaks associated with dolomite ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), which was consistent with the XRF data showing high calcium and magnesium contents. Fineness test results indicated that the optimal grinding time was 120 minutes, and laser particle size analysis confirmed that the RMB achieved finer granulometry than clinker. Mortars with RMB showed variations in consistency index, from -1.50 to 1.03 cm, eliminating the need for plasticizers. The performance index ranged from 98% to 148% after 7 days of curing and from 75% to 115% at 28 days, compared to the control mortar. Capillary absorption increased with higher replacement levels. Total volumetric porosity obtained through  $\mu$ CT ranged from 14% to 22% at 7 days and from 13% to 19% at 28 days. Therefore, it is concluded that white dolomitic marble waste, at replacement levels between 15% and 35%, enabled the production of mortars with consistency, porosity, and compressive strength comparable to conventional mortars.

Keywords: Marble Waste, Sustainability, Cement Replacement

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma da metodologia .....	28
Figura 2: Clinquer.....	29
Figura 3: Sulfato de Cálcio di-hidratado .....	30
Figura 4: Resíduo de mármore .....	31
Figura 5: Curva granulométrica.....	33
Figura 6: Moinho de esferas SL 36-21 .....	34
Figura 7: Sequência de moldagem.....	38
Figura 8: Rompimento do corpo de prova.....	39
Figura 9: Ensaio de absorção por capilaridade.....	43
Figura 10: Extração de amostra para realização de MCT .....	44
Figura 11: DRX do resíduo de mármore .....	46
Figura 12: Gráfico de Finura x Tempo de moagem .....	47
Figura 13: Gráfico de Abatimento x Traços .....	49
Figura 14 (a): Gráfico de Resistência à compressão x Traços .....	50
Figura 15 (a): Gráfico de absorção por capilaridade aos 7 dias x Tempo de absorção .....	53
Figura 16: Gráfico de porosidade total x Traços .....	54

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Composição química do resíduo de mármore nos artigos estudados .....	25
Tabela 2: Ensaio de granulometria da areia.....	32
Tabela 3: Parâmetros de moagem do material.....	34
Tabela 4: FRX - Resíduo de mármore.....	36
Tabela 5: Composição das argamassas.....	37
Tabela 6: Exemplo de tabela utilizada para cálculo de resistência.....	41
Tabela 7: Resultado do FRX: clínquer e mármore .....	45
Tabela 8: Granulometria do Resíduo de mármore e do Clínquer.....	48
Tabela 9: Resultado médio da resistência à compressão .....	50

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1: Resumo De Artigos Com Substituição de Cimento Por Mármore.....21

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVO .....	14
1.1.1	<i>Objetivos específicos</i> .....	14
1.2	JUSTIFICATIVA.....	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>16</b>
2.1	RESÍDUOS DE MÁRMORE BRANCO.....	16
2.1.1	<i>Origem</i> .....	16
2.1.2	<i>Geração</i> .....	17
2.1.3	<i>Impactos ambientais</i> .....	19
2.2	APLICAÇÕES DE MÁRMORE BRANCO EM COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO PORTLAND	20
2.2.1	<i>Aplicações recorrentes</i> .....	21
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>28</b>
3.1	MATERIAIS .....	29
3.1.1	<i>Clinquer</i> .....	29
3.1.2	<i>Sulfato de Cálcio</i> .....	29
3.1.3	<i>Areia natural</i> .....	30
3.1.4	<i>Resíduo de Mármore branco dolomítico</i> .....	31
3.2	MÉTODOS .....	32
3.2.1	<i>Ensaio de granulometria da areia</i> .....	32
3.2.2	<i>Moagem do mármore</i> .....	34
3.2.3	<i>Preparação de amostras para Difração de Raio X (DRX)</i> .....	36
3.2.4	<i>Moldagem dos corpos de prova</i> .....	37
3.2.5	<i>Ensaio à compressão dos corpos de prova</i> .....	39
3.2.6	<i>Ensaio de absorção por capilaridade</i> .....	42
3.2.7	<i>Preparação de amostras para Microtomografia Computadorizada (MCT) de argamassa</i> .....	44
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>45</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO INICIAL .....	45

4.2	ESTUDO DE MOAGEM.....	46
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA .....	48
4.3.1	<i>Argamassa no estado fresco – Determinação do índice de consistência .....</i>	48
4.3.2	<i>Ensaio de Resistência à Compressão.....</i>	49
4.3.3	<i>Ensaio de Absorção por Capilaridade.....</i>	52
4.3.4	<i>Micro Tomografia – Porosidade total .....</i>	54
5	<b>CONCLUSÃO.....</b>	56
6	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	58

## 1 INTRODUÇÃO

As rochas ornamentais são aquelas que após serem beneficiadas, destacam características exclusivas, em virtude da estrutura, textura e disposição dos minerais (Abreu, *et al.*, 1990). Essas são amplamente utilizadas na construção civil desde 2500 a.C., os primeiros registros da sua utilização foram na Mesopotâmia e no Egito (SINDIROCHAS, 2013). No contexto atual, apresenta-se um aumento na sua produção, podendo ser facilmente encontradas em diferentes aplicações como bancadas, pisos e revestimentos.

De acordo com a Asssociação Brasileira de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS) (2024), o Brasil foi o quinto maior produtor de rochas ornamentais, e em 2023 o país produziu 10 milhões de toneladas de rochas ornamentais, gerando 3,76 milhões de toneladas de rejeito. A produção do mármore equivale a 29% da produção total de rochas ornamentais do país, correspondendo a 2,9 milhões de toneladas por ano (ABIROCHAS, 2024). Apesar do crescimento da produção ser positivo para economia, ele acarreta o aumento da geração de resíduos provenientes dos processos produtivos. Sendo assim, atualmente, com a rigidez das leis governamentais que visam a sustentabilidade, as empresas produtoras de rochas ornamentais foram obrigadas a realizar o descarte apropriado dos resíduos formados durante o processo de beneficiamento das rochas, que acarreta maiores custos para as indústrias (Almeida *et al.*, 2020).

Diante da necessidade do descarte adequado, a aplicação do rejeito em processos industriais pode viabilizar uma destinação sustentável do material. A substituição parcial do cimento Portland por rejeito de mármore em argamassas cimentícias, se mostra promissora por aproveitar o pó de mármore que seria descartado e reduzir a quantidade de cimento que seria utilizada na matriz (Aruntas *et al.*, 2010; Almada *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2018).

De acordo com o SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, no ano de 2023 houve o consumo de 62,21 milhões de toneladas de cimento (SNIC, 2024). Embora a elevada utilização do aglomerante esteja associada ao desenvolvimento dos setores de infraestrutura e construção civil do país, sua produção afeta a sustentabilidade, pois emite grandes quantidades de gases de efeito estufa na etapa de queima de seu processo produtivo, sendo estimada entre 0,65 a 0,92 toneladas de CO<sub>2</sub> para cada tonelada de clinquer produzida (Soomro, 2023). Desse

modo, segundo o SNIC (2024), a produção de cimentos com adições de materiais “além de diversificar as aplicações e características específicas do cimento, contribui significativamente para a redução de emissões e do consumo de combustíveis, representando também uma solução ambientalmente correta para subprodutos de outros processos produtivos e para a preservação de recursos naturais não renováveis.” (SNIC, 2024, p. 21)

Dessa forma, a utilização de resíduos de mármore branco dolomítico como adição no cimento representa uma alternativa promissora. Além de contribuir para a destinação adequada de resíduos sólidos da indústria de rochas ornamentais, essa prática tem potencial para reduzir o impacto ambiental da produção de cimento, preservando recursos naturais e diminuindo as emissões de CO<sub>2</sub>. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo pesquisar argamassas com substituição parcial do cimento Portland por resíduos de mármore branco dolomítico, avaliando as propriedades resultantes dessa adição. Essa proposta insere-se no contexto da busca por alternativas sustentáveis e do reaproveitamento de resíduos industriais.

## 1.1 **Objetivo**

Avaliar o efeito da utilização de resíduos de mármore branco dolomítico como material filer em substituição parcial ao cimento Portland na formulação de argamassas alternativas.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- Estudar as propriedades dos materiais de partida e a sua influência sobre o comportamento mecânico à compressão dos compósitos obtidos;
- Identificar o teor adequado entre os avaliados para substituição do cimento por resíduos de mármore dolomítico com base na propriedade de absorção de água, compressão e porosidade.
- Analisar a relação entre as propriedades identificadas, de modo a propor o desenvolvimento de matrizes para investigações microestruturais.

## 1.2 Justificativa

A crescente demanda por materiais de construção, especialmente o cimento Portland, tem impulsionado o setor da construção civil, ao mesmo tempo em que acarreta sérios impactos ambientais. A produção de cimento gera grande emissão de CO<sub>2</sub>, além de consumir grandes quantidades de energia e recursos naturais não renováveis (Scrivener *et al.*, 2018). Paralelamente, a indústria de rochas ornamentais, em especial a de mármore, gera volumes expressivos de resíduos durante os processos de corte e beneficiamento que afetam a morfologia, hidrologia e fertilidade do solo da área ao redor, agravando problemas ambientais (Rana *et al.*, 2015).

Diante desse cenário, torna-se essencial buscar alternativas que promovam a sustentabilidade, reduzindo o volume de resíduos descartados. A substituição parcial do cimento Portland por resíduos de mármore dolomítico surge como uma solução promissora, pois alia o reaproveitamento de um resíduo industrial abundante à redução da pegada de carbono do setor (Aliabdo *et al.*, 2014). Estudos demonstram melhora das propriedades reológicas, apesar queda na resistência à compressão com adição desses materiais (Singh *et al.*, 2017; Almada *et al.*, 2022).

Outro trabalho recente desenvolvido por Yamanel *et al.* (2019) demonstrou que a substituição de até 10% do cimento por pó de mármore resultou em argamassas com resistência à compressão equivalente ou até superior à da argamassa de referência, além de melhorar a trabalhabilidade. De forma semelhante, Beltrão *et al.* (2022) observaram uma melhora na trabalhabilidade e substituindo de 2,5 a 10% do cimento, perceberam que nenhum teor das amostras de substituição apresentou resultados estatisticamente diferente do concreto de referência, evidenciando o potencial técnico do uso desse tipo de resíduo em matrizes cimentícias.

Sendo assim, este trabalho justifica-se pela investigação baseada em princípios de interesse ambiental, econômica e técnica de sua proposta, buscando colaborar com o desenvolvimento de materiais ecoeficientes, alinhados às diretrizes atuais de responsabilidade socioambiental e inovação na construção civil.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura do trabalho procurou tratar a importância dos temas abordados, como a geração do resíduo de mármore e seus impactos ambientais, além de uma breve revisão narrativa acerca da aplicação dos resíduos de mármore na produção de compósitos e matrizes a base de Cimento Portland.

### 2.1 Resíduos de mármore branco

#### 2.1.1 Origem

Mármore é uma rocha metamórfica originária de calcários ou outras rochas sedimentares constituídas por carbonato de cálcio ou de magnésio e o dolomito é uma rocha sedimentar com carbonato de magnésio e cálcio em sua composição (ABNT, 1995). O mármore dolomítico é encontrado em diversas regiões do mundo, especialmente em locais onde ocorrem grandes formações geológicas de rochas carbonáticas (SINDIROCHAS, 2013). No Brasil, o estado do Espírito Santo, se destaca como maior produtor nacional de rochas ornamentais, com destaque para o mármore dolomítico na região de Cachoeiro de Itapemirim (ANM, 2012).

Essas rochas podem ser polidas e apresentam grande variedade de texturas e cores, o que as torna muito valorizadas. Sua composição principal é de dolomito e calcário. A coloração varia conforme o tipo, a quantidade de impurezas presentes na amostra e o tempo de duração do processo de metamorfose (SINDIROCHAS, 2013).

O calcário e o dolomito são as rochas carbonatadas mais comercializadas no mundo e são utilizadas na obtenção de blocos para indústria da construção, material para agregados, cimento, cal e em rochas ornamentais (Luz; Lins, 2005). O calcário é uma rocha sedimentar proveniente de material precipitado por agentes químicos com presença majoritária de calcita

( $\text{CaCO}_3$ ) e o dolomito, que também é uma rocha sedimentar, possui em sua composição predominantemente a dolomita ( $\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$ ) (Luz; Lins, 2005).

Segundo Machado *et al.* (2015, *apud* Demartini, 2017) a predominância de calcita e dolomita na composição do mármore define sua classificação, sendo denominado mármore dolomítico quando há maior concentração de dolomita, ou mármore calcítico quando a calcita é o mineral predominante. Ainda de acordo com os autores, os marmores também contêm minerais acessórios em sua composição, porém seu impacto é menos significativo em comparação com os minerais principais, calcita e dolomita. Sendo assim, composição varia conforme os minerais originais (calcita e dolomita) e as impurezas presentes durante sua formação.

### 2.1.2 Geração

O ciclo produtivo do mármore é dividido em três etapas principais: extração, beneficiamento primário e beneficiamento final (SINDIROCHAS, 2013). Na extração, ocorre a remoção do material útil dos maciços rochosos através de técnicas como corte com fio helicoidal, fio diamantado, corte contínuo e *jet flame* (Gonçalves *et al.*, 2000). O resultado são blocos com arestas aproximadamente retangulares, de tamanhos variados, que buscam maximizar o aproveitamento do material. Nesta fase, são gerados resíduos de lavra em forma de pedaços irregulares, decorrentes do corte ou de fissuras no maciço (Gonçalves *et al.*, 2000).

O beneficiamento primário, também conhecido como serragem constitui-se do corte dos blocos para a obtenção de chapas com medidas aproximadas do produto final, essa etapa é feita com auxílio de maquinário, como teares com lâminas diamantadas (SINDIROCHAS, 2013). Segundo Pontes (2000), na etapa do beneficiamento primário, são realizados cortes úmidos no maciço para obtenção de chapas com espessuras variadas, realizadas com auxílio de equipamentos, denominados talhas e teares, gerando grande volume de rejeito em forma de polpa.

No beneficiamento final, as peças tomam sua forma, dimensões e aparência definitivas, passando por polimento e acabamento (SINDIROCHAS, 2013). O polimento confere brilho e

lustre à peça, para que então ela seja acabada de acordo com sua finalidade comercial. Assim como nas etapas anteriores, são gerados resíduos, porém em quantidades inferiores. (Pontes, 2000; Gonçalves, 2000)

A ABIROCHAS (2024) estima que 41% do maciço se transforma em rejeito de processamento, enquanto apenas 59% é comercializado. A legislação brasileira proíbe expressamente o corte e acabamento a seco de rochas ornamentais, devido ao risco de silicose (BRASIL, 2008). Esta determinação leva à adoção de cortes úmidos, que geram resíduos na forma pastosa.

Os resíduos de mármore são comumente descartados em lagoas de decantação, aterros clandestinos ou leitos de rios, uma prática que demanda urgentemente a implementação de sistemas adequados de manejo (Souza *et al.*, 2009). A gestão eficiente desses resíduos em todas as etapas produtivas se apresenta como solução fundamental para reduzir impactos ambientais e maximizar o aproveitamento dos materiais, tanto de granulometria fina quanto grossa (Campos *et al.*, 2009).

Souza *et al.* (2009) classificam esses resíduos em duas categorias: grossos (pedaços descartados na extração) e finos (provenientes da serragem e polimento). Os resíduos grossos podem ser submetidos a processos de britagem ou moagem para posterior utilização como matéria-prima na produção de brita, areia artificial, argamassas e tintas (Campos *et al.*, 2009). Os resíduos finos, como a lama abrasiva gerada no corte de rochas, requerem tratamento para separação sólido-líquida, realizado por equipamentos como decantadores, filtros prensa e tanques com materiais filtrantes. A água tratada é reutilizada no processo produtivo, enquanto os sólidos são geralmente dispostos em leitos de secagem nas serralherias ou em depósitos municipais (Campos *et al.*, 2009)

Esses resíduos geram desafios ambientais, pois são comumente descartados em áreas agrícolas, terrenos baldios ou aterros (Yurdakul, 2020). Thakur *et al.* (2020) estudaram soluções que visam reciclar o resíduo de mármore, os autores apresentaram viabilidade de substituição do resíduo em tijolos cerâmicos, blocos ecológicos e em compósitos de epóxi e borracha. Contudo, essas soluções ainda não alcançaram adoção generalizada no setor industrial, mantendo-se a geração de resíduos superior à sua reaproveitamento. Essa lacuna entre o potencial de reaproveitamento e a prática industrial atual aponta para a necessidade de desenvolver estratégias mais eficazes de gestão de resíduos no setor de rochas ornamentais.

O ciclo produtivo do mármore, desde a extração até o beneficiamento final revela-se contraditório, pois enquanto as técnicas industriais buscam otimizar o aproveitamento da matéria-prima, cerca de 41% do maciço transforma-se em rejeitos (ABIROCHAS, 2024). Apesar das soluções tecnológicas existentes para o reaproveitamento desses resíduos, como a transformação de resíduos grossos em materiais de construção e o tratamento da lama abrasiva para recuperação de água e sólidos (Campos *et al.*, 2009), a implementação em larga escala ainda é pouco difundida. A intensificação do uso de tecnologias modernas de corte na extração de mármore tem aumentado significativamente a geração de resíduos finos. Esses resíduos, quando descartados de forma inadequada, por meio de aterros ou simplesmente abandonados, geram impactos ambientais expressivos, como observado na Bacia de Mármore de Carrara, na Itália, onde mais da metade do mármore extraído torna-se resíduo (Tazzini *et al.*, 2024). Esse cenário reforça a necessidade urgente de soluções que possibilitem o descarte apropriado dos resíduos, visando a viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental.

### 2.1.3 Impactos ambientais

A NBR 1004 (ABNT, 2004) define resíduos sólidos como resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, como os resíduos que contém partículas de rochas ou minerais (ABNT, 2004).

No caso do mármore branco dolomítico, estudos (Demartini, 2017; Cruz, 2019) confirmam sua classificação como não perigoso e não inerte (Classe II B), conforme o Anexo H da NBR 10004 (ABNT, 2004). No entanto, embora não seja tóxico, seu descarte inadequado pode causar impactos ambientais significativos, como alterações na permeabilidade do solo e contaminação indireta de corpos hídricos devido ao acúmulo de partículas finas (Rana *et al.*, 2015).

O manejo dos resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais representa um desafio para os empresários do setor. A destinação adequada desses resíduos nem sempre é simples. Mesmo com a existência de locais apropriados para o descarte, em muitos casos empresários de pequenas e médias não dispõe desse recurso, aumentando os custos de produção (Lohar; Shrivastava, 2024). No passado, era comum que esses resíduos fossem descartados diretamente nos rios, o que provocava diversos problemas ambientais, como o comprometimento do fluxo das águas, assoreamento, aumento da turbidez, redução da oxigenação e prejuízos significativos às condições naturais dos ambientes aquáticos (Souza *et al.*, 2009).

Tendo em vista os prejuízos causados pelo descarte inadequado do mármore e os gastos adicionais às marmorarias para armazenamento ou disposição final do resíduo, a reciclagem do mesmo pode mostrar-se como um caminho viável economicamente e ecologicamente. Sendo assim, para que haja a reutilização do rejeito de mármore, há a necessidade do desenvolvimento de pesquisas que tornem o uso industrial do rejeito, com a possibilidade de reinserção deste material na cadeia produtiva.

## 2.2 Aplicações de mármore branco em compósitos à base de Cimento Portland

O cimento é o produto manufaturado de maior volume no planeta e o segundo material mais consumido no mundo, sendo superado apenas pela água (Scrivener *et al.*, 2018). Quando combinado com água e agregados minerais, dá origem a materiais como concreto e argamassa, que são fundamentais para a construção civil. Estes materiais estão presentes em grande parte do ambiente construído, sendo indispensáveis para obras de infraestrutura, edificações residenciais, comerciais e industriais. Sua ampla utilização se deve, principalmente, às características de durabilidade, versatilidade e facilidade de aplicação.

Por outro lado, a cadeia produtiva do cimento está diretamente associada a elevados impactos ambientais, especialmente no que se refere às emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Se a produção de cimento continuar seguindo os métodos tradicionais, o crescimento das construções resultará em um aumento significativo na emissão de gases de efeito estufa, o que é insustentável frente aos atuais problemas climáticos (Scrivener *et al.*, 2018). Diante desse

cenário, a fim de mitigar os efeitos negativos causados pela produção de cimento Portland, são realizadas pesquisas científicas acerca da substituição parcial do material nas matrizes e compósitos cimentícios.

### 2.2.1 Aplicações recorrentes

A produção de mármore acarreta na geração de grande quantidade de resíduos, impactando na morfologia, ecologia, hidrologia, fertilidade do solo e ocupação do solo (Li *et al.*, 2018). Recentemente, pesquisadores têm estudado o material e suas possibilidades de aplicação, sendo assim, foram selecionados artigos que tratam a utilização do material como substituição parcial do cimento em compósitos e matrizes cimentícias, organizados no Quadro 1 apresentado abaixo.

Quadro 1: Resumo de artigos com substituição de cimento por mármore

Ano	Autores	Aspectos metodológicos	Principais resultados
2022	Lezzerini <i>et al.</i>	Argamassas com substituição parcial do cimento em 5, 10, 15, 20 e 25%; fator água/cimento = 0,5	A substituição de até 25% do cimento por resíduo de mármore reduziu a resistência em relação à argamassa de referência (59 MPa), mas ainda resultou em valores acima de 43 MPa, indicando potencial estrutural e viabilidade de reciclagem.
2010	Aruntas <i>et al.</i>	Argamassas com substituição parcial do cimento em 2,5, 5, 7,5 e 10%.	A adição de 10% de pó de mármore (WMD) ao cimento é viável, não altera o tempo de pega e pode reduzir custos, além de melhorar a resistência à compressão em comparação ao Cimento Portland Pozolânico. Além disso, o aumento de WMD influencia positivamente a densidade, mas reduz a superfície específica.

Ano	Autores	Aspectos metodológicos	Principais resultados
2019	Yamanel <i>et al.</i>	Argamassas com substituição parcial do cimento em 5, 10, 15 e 20%; fator água/cimento = 0,5	A adição melhorou a trabalhabilidade. Porém, aumentou os valores de absorção de água e porosidade. Argamassas com 5% e 10% de pó de mármore apresentaram resistência à compressão e à flexão igual ou superior à da argamassa de referência, enquanto teores de 15% e 20% resultaram em redução dessas resistências.
2015	Rana <i>et al.</i>	Concreto com substituição parcial do cimento em 5, 10, 15, 20 e 25%; fator água/cimento = 0,38	Com a substituição de 10% é possível obter concreto com resistência adequada, não afetando significativamente a formação dos produtos de hidratação, mas substituições maiores podem prejudicar as propriedades mecânicas e a durabilidade
2020	Benjeddou <i>et al.</i>	Argamassas com substituição parcial do cimento em 5, 15 e 25%; fator água/cimento = 0,5	A finura e o percentual de substituição do pó de mármore influenciam diretamente a resistência e a trabalhabilidade das argamassas. Substituições de até 5% mantêm o desempenho mecânico, mas teores maiores reduzem a resistência devido à menor quantidade de $\text{SiO}_2$ reativo e aumento da demanda de água. A finura excessiva também afeta negativamente as propriedades físicas e químicas da matriz.
2018	Li <i>et al.</i>	Argamassas com substituição parcial da pasta em 5, 10, 15 e 20%; variou o fator água/cimento (0,40 a 0,55)	Em comparação aos métodos tradicionais de substituição de cimento ou agregados, o método de substituição da pasta permite uma redução de até 33% no teor de cimento. Além disso, a adição de pó de mármore nesse formato contribui para a diminuição da carbonatação, da absorção de água e da retração da argamassa, apresentando grande potencial de aplicação também com outros tipos de resíduos ou materiais de enchimento.
2017	Singh <i>et al.</i>	Concreto com substituição parcial do cimento em 10, 15, 20 e 25%; variou o fator água/cimento (0,35 a 0,45)	A resistência mecânica aumenta com até 15% de substituição para relações água/cimento de 0,35 e 0,40, e até 10% para 0,45. A consistência padrão diminui e os tempos de pega aumentam levemente, o que favorece o transporte e aplicação do concreto.

Ano	Autores	Aspécitos metodológicos	Principais resultados
2023	Santana <i>et al.</i>	Concretos com adição e substituição do cimento em 5, 7,50 e 10%; variou o fator água/cimento (0,56 a 0,62)	No geral, a incorporação de 5% em adição do resíduo apresentou melhor desempenho, a resistência à compressão axial ficou mais próxima da referência, ocorreu uma melhoria nas propriedades físicas dos concretos. Porém comparando todos os traços experimentados, nenhum apresentou discrepâncias nas propriedades quando comparados com o traço sem resíduos.
2022	Almada <i>et al.</i>	Argamassa com substituição do cimento em 20%; variou o fator água/cimento (0,44 a 0,50)	O resíduo rico em sílica melhorou a estrutura porosa e a resistividade elétrica da argamassa, especialmente com menor relação a/c. Apesar da leve queda na resistência à compressão e maior carbonatação, a trabalhabilidade foi mantida com menos água. Mostrou-se um material sustentável e eficiente como filer na produção de argamassas.

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Com base no Quadro 1, percebe-se que há uma tendência de redução da resistência à compressão dos compósitos particulados em substituições com fatores maiores que 10%. Os compósitos com substituições inferiores a essa porcentagem apresentam resultados satisfatórios, de modo a manter ou aumentar as características físicas e de durabilidade quando comparados com os valores de referência. O estudo de Lezzerini *et al.* (2022) aponta um decréscimo de resistência com substituição de 25% do cimento, porém com valores que atendem aos parâmetros normativos.

Os trabalhos apresentados tratam da finura do material. Materiais muito finos incorporados em matrizes cimentícias, exercem o chamado efeito filer, que consiste no preenchimento dos vazios entre os grãos de cimento e agregados, promovendo uma melhoria significativa na compactação da microestrutura, reduzindo espaços capilares e, consequentemente, a porosidade do material endurecido (Neville, 2013).

Além disso, Mehta e Monteiro (2014) destacam que partículas muito finas servem como superfícies de nucleação para os produtos de hidratação, especialmente o C-S-H (silicato de cálcio hidratado). As partículas atuantes no efeito filer influenciam a hidratação tanto por

fornecerem sítios adicionais de nucleação para os hidratos quanto por melhorarem o empacotamento das partículas, reduzindo a porosidade (Scrivener *et al.*, 2016). Isso favorece uma hidratação mais eficiente do cimento nas idades iniciais, acelerando o desenvolvimento da resistência.

Portanto, a incorporação de resíduos minerais finos, como o pó de mármore e de granito, pode atuar como efeito filer na matriz cimentícia, otimizando o empacotamento das partículas. Almada *et al.* (2022) estudou uma matriz com substituição de 20% do cimento por resíduos de mármore e granito em argamassas em diferentes relações água/cimento. O estudo indicou que o resíduo atuou como material filer, contribuindo para o refinamento da porosidade, sem que houvesse grande comprometimento da resistência à compressão em traços com baixa relação água/cimento.

Rana *et al.* (2015) observou que nos traços de concreto com até 10% de substituição, os poros são bem preenchidos, densificando a microestrutura devido a finura das partículas do resíduo, porém substituições com teores maiores podem causar danos a matriz. Essa tendência também foi estudada por Benjeddou *et al.* (2020), e segundo os autores, a relação água/cimento, que indica a queda na resistência e trabalhabilidade, é fortemente influenciada pela adição de filers finos. Isso ocorre porque a finura do filer e sua taxa de substituição afetam significativamente a nucleação, a formação de aluminatos e carboaluminatos, e a microestrutura da matriz do cimento, impactando assim a resistência à compressão (Neville, 2013).

Sendo assim, alguns trabalhos variaram o fator água/cimento, a fim de garantir as quantidades ideais de água para a mistura, em um aspecto geral, as matrizes com menor fator a/c apresentam melhores resultados de resistência à compressão (Almada *et al.*, 2022; Singh *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2018).

Outro ponto a ser analisado é a composição química do resíduo utilizado como substituto parcial do cimento apresentado pelos autores, e resumido na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química do resíduo de mármore nos artigos estudados

							Santana <i>et al.</i> , 2023 <i>l</i>
<b>CaO</b>	52,28	42,13	19	52,34	28,63	53,06	50,48
<b>SiO<sub>2</sub></b>	3	44,1	42,8	1,74	3,86	0,66	26,37
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,14	2,2	8,07	<0,01	4,62	0,2	7,17
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,39	2,98	2,63	2,75	0,8	1,45	6,36
<b>MgO</b>	0,5	3,72	3,89	1,75	16,9	0,45	4,27
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	-	0,08	1,85	<0,01	-	0,09	-
<b>K<sub>2</sub>O</b>	-	0,09	2,59	<0,01	-	0,02	2,28
<b>CaC<sub>3</sub></b>	94,88	-	-	-	-	-	-
<b>MgCO<sub>3</sub></b>	1,04	-	-	-	-	-	-
<b>S</b>	0,03	-	-	-	-	-	-
<b>TiO<sub>2</sub></b>	-	-	0,69	0,02	-	-	1,67
<b>MnO</b>	-	-	0,05	-	-	0,02	-
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	-	-	0,33	0,13	-	-	-
<b>SO<sub>3</sub></b>	-	-	-	-	-	0,24	1,08
<b>SrO</b>	-	-	-	-	-	0,12	-
<b>BaO</b>	-	-	-	-	-	0,03	-
<b>LOI</b>	42,6	3,5	2,29	42,94	43,3	-	-

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Observa-se que o principal componente é o óxido de cálcio (CaO), com teores variando de 19% a 53,06%, o que pode estar relacionada a presença de calcário e dolomita no resíduo. Os maiores teores foram identificados nos estudos de Yamanel *et al.* (2019) (53,06%) e Lezzerini *et al.* (2022) (52,34%), enquanto o menor valor foi reportado por Almada *et al.* (19%). O teor de sílica (SiO<sub>2</sub>) varia consideravelmente, indo de 1,74% a 44,1%. O estudo de Rana *et al.* (2015), Almada *et al.* (2022) e Santana *et al.* (2023) apresentam valores expressivos de SiO<sub>2</sub>, indicando um resíduo com características mais próximas de materiais silicatados.

Quanto aos óxidos de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), destaca-se o estudo de Almada *et al.* (2022) e Santana *et al.* (2023), com valores mais elevados de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, o que pode indicar contaminação com argilas ou outros minerais aluminosos. O óxido de magnésio (MgO) apresenta variações significativas, com destaque para Singh *et al.* (2017) (16,9%), provavelmente associado à presença de dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) no resíduo. Outros elementos

aparecem em concentrações muito baixas, quando presentes, indicando pouco impacto na reatividade do resíduo.

Outro aspecto relevante é a absorção de água dos compósitos e matrizes cimentícias produzidas com substituição do cimento por resíduos de mármore. A NBR 9778 (ABNT, 2009) define absorção pelo processo em que a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso, em matrizes cimentícias, representa o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa em estado seco.

Do ponto de vista da durabilidade, é importante a obtenção de uma baixa permeabilidade. Consequentemente, uma mistura com baixa relação água/cimento é vantajosa por alcançar o estágio de segmentação dos poros após um curto período de cura úmida, porém uma baixa relação a/c não é suficiente, pois o concreto deve ser denso com quantidade otimizada de finos, para que seus poros não estejam conectados de modo a afetar a sua permeabilidade (Neville, 2013).

Sendo assim, um parâmetro importante a ser estudado é a absorção de água. Santana *et al.* (2023), ao realizar ensaio de absorção por imersão, não encontrou diferenças significativas entre o concreto de referência e os concretos com substituição e adição de mármore com teores de até 10%. Já Yamanel *et al.* (2019) observou aumento da absorção proporcional ao aumento do teor de substituição do resíduo em seus corpos de prova de argamassa. Os autores associaram esse resultado ao fato do mármore ser um material inerte, sem capacidade de reagir com a água. Com o aumento da taxa de substituição, há menos cimento disponível (aumento do fator a/c), o que leva à formação de menor quantidade de produtos de hidratação.

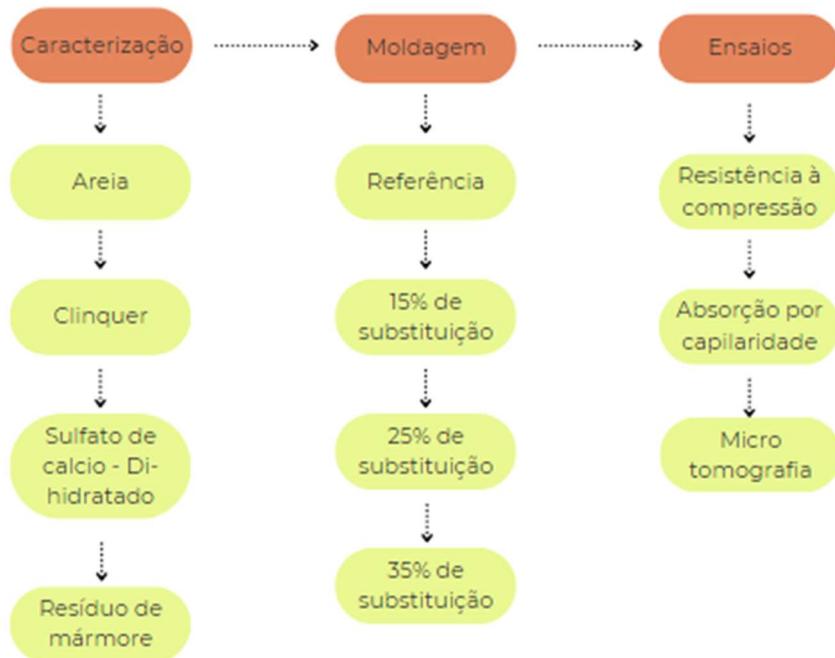
Além do ensaio de absorção por imersão, também é comum a realização de ensaios de absorção por capilaridade. Lezzerini *et al.* (2022) detectou uma redução da absorção de água por capilaridade nos traços com 5 e 10% de substituição quando comparados com o valor de referência, porém para traços com substituição mais elevada, a absorção apresentou aumento. Já Almada *et al.* (2022) que realizou traços com diferentes fatores de a/c verificou que o traço com 20% de substituição resultou em menor absorção final de água por capilaridade, devido ao melhor empacotamento das partículas e à menor relação água/cimento.

Diante do exposto, fica evidente a possibilidade de produção de argamassa com substituição de cimento por resíduo de mármore. Diferentes trabalhos mostraram que o material atuou como filer, melhorando o empacotamento e apresentou resultados satisfatórios a respeito da resistência à compressão e absorção de água.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados neste estudo abrangearam várias etapas, incluindo a seleção das matérias-primas, o processamento e a realização de ensaios laboratoriais. A Figura 1 apresenta o fluxograma experimental elaborado.

Figura 1: Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A metodologia adotada neste estudo foi dividida em três etapas principais: caracterização dos materiais, moldagem dos corpos de prova e realização dos ensaios. Na fase de caracterização, foram analisados os materiais utilizados na composição das argamassas, incluindo areia, clínquer, sulfato de cálcio di-hidratado e o resíduo de mármore. Em seguida, na etapa de moldagem, foram produzidos corpos de prova com substituição do cimento por resíduo de mármore em teores de 15%, 25% e 35%, além de um traço de referência sem substituição. Por fim, os corpos de prova foram submetidos a ensaios para avaliação do desempenho, incluindo resistência à compressão, absorção por capilaridade e microtomografia.

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Clínquer

Para produção das argamassas foi utilizado clínquer (Figura 2) conceituado como produto intermediário da fabricação do cimento Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas e que se obtém pela queima a altas temperaturas ( $1450^{\circ}\text{C}$ ) de misturas convenientemente moídas e dosadas de materiais calcários e argilosos, conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018)

Figura 2: Clinquer



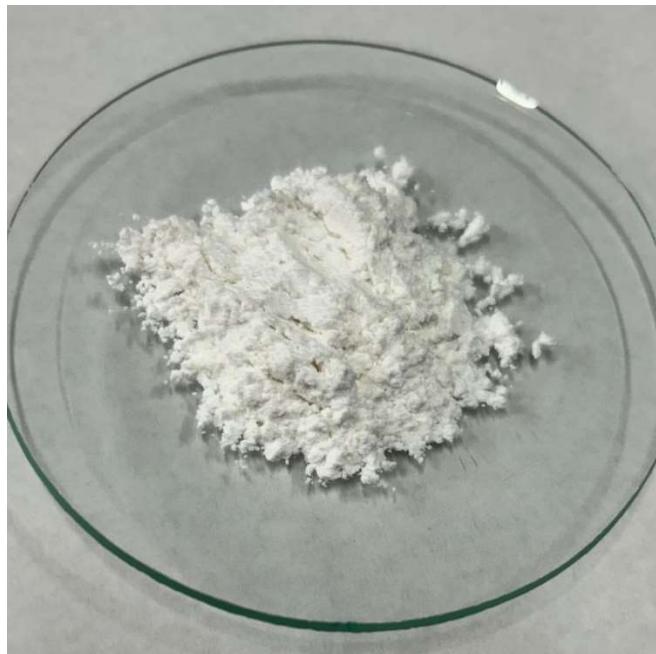
Fonte: Arquivo da autora (2025)

#### 3.1.2 Sulfato de Cálcio

A reação do Aluminato tricálcico, fase presente no clínquer, com a água é extremamente rápida e intensa, gerando o enrijecimento instantâneo da pasta, conhecida como pega

instantânea. Então, adiciona-se sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ao clínquer, para que o endurecimento inicial seja controlado (Neville, 2016). Nesse sentido, foi utilizando o sulfato de cálcio di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) do laboratório Synth, pureza  $\geq 98\%$  e massa molar 172,17  $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$  (Figura 3).

Figura 3: Sulfato de Cálcio di-hidratado



Fonte: Arquivo da autora (2025)

### 3.1.3 Areia natural

As argamassas foram produzidas utilizando areia de origem natural, adquirida no comércio local. Antes do uso, a areia foi lavada para a retirada de impurezas e seca em estufa a  $100 \pm 5^\circ\text{C}$  por 48 horas. A areia seca foi peneirada na peneira de 2,4 mm para retirada da parte mais grossa da areia.

### 3.1.4 Resíduo de Mármore branco dolomítico

Os resíduos de mármore branco dolomítico utilizados neste trabalho foram obtidos a partir do descarte de processos de beneficiamento de rochas ornamentais de uma jazida localizada no estado de Espírito Santo. Após a coleta do resíduo pastoso, o material passou por um processo de secagem em estufa a  $100 \pm 5$  °C por 48 horas para eliminação da umidade, conforme apresentado na Figura 4. Em seguida, foi submetido a um estudo de moagem em moinho de bolas por 30-120 minutos, com o objetivo de reduzir sua granulometria, conforme descrito no item 3.2.2.

Figura 4: Resíduo de mármore



Fonte: Arquivo da autora (2025)

### 3.2 Métodos

#### 3.2.1 Ensaio de granulometria da areia

Após a obtenção da areia em comércio local, ela foi lavada com água da rede local até que não se visse pulverulentos, então foi seca a 100°C por 48 horas, e peneirada com a peneira de abertura 2,4mm.

Foi realizado ensaio de granulometria na areia natural adquirida no comércio local. Amostrou-se por três vezes aproximadamente 300g de areia pelo método do quarteamento, então a areia foi peneirada por 5 minutos seguindo a série normal de peneiras estabelecida pela norma NBR 7217 (ABNT, 2003).

Com a areia previamente peneirada, foram pesadas as massas retidas em cada peneira, permitindo a obtenção da massa retida por graduação. Em seguida, calcularam-se a porcentagem de areia retida por peneira e a porcentagem acumulada. A partir desses dados, foi determinado o módulo de finura, definido pela NBR 7217 (ABNT, 2003) como a soma das porcentagens acumuladas em massa retidas nas peneiras da série normal, dividida por 100. Também foi calculada a dimensão máxima característica, definida pela mesma norma como a grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira (da série normal ou intermediária) na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Ensaio de granulometria da areia

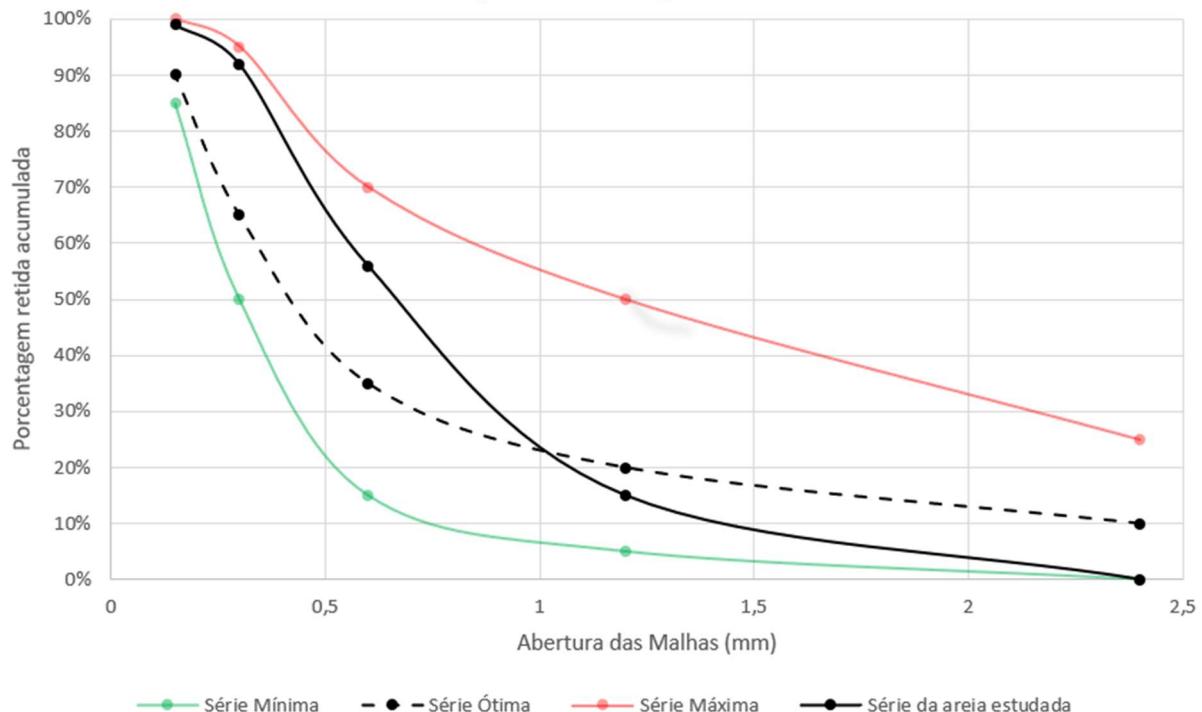
Graduação (mm)	Massa Retida (g)	Retida (%)	Acumulada (%)	Massa Retida (g)	Retida (%)	Acumulada (%)	Massa Retida (g)	Retida (%)	Acumulada (%)
<b>Amostra 1</b>			<b>Amostra 2</b>			<b>Amostra 3</b>			
2,4	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
1,2	53,13	18%	18%	37,78	13%	13%	52,58	15%	15%
0,6	120,5	40%	58%	119,53	40%	52%	145,76	43%	58%
0,3	105,95	35%	93%	116,5	39%	91%	119,5	35%	93%
0,15	18,15	6%	99%	22,18	7%	98%	20,33	6%	99%
Fundo	0,41	0%	99%	0,57	0%	99%	0,58	0%	100%

<b>Total (g)</b>	298,14	296,56	338,75
<b>Massa Inicial (g)</b>	301,71	300,89	340,01
<b>Módulo de Finura</b>	2,67	2,54	2,67
<b>Dmáx Característico (mm)</b>	2,4	2,4	2,4

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Com os dados da Tabela 2, foi elaborada uma curva granulométrica (Figura 5) representando porcentagens retidas acumuladas médias e comparadas com os valores máximo, mínimo e ótimo estabelecidos pela norma NBR 7211(ABNT, 2003). O gráfico mostra que a curva da areia estudada está dentro dos limites das séries mínima e máxima, indicando que a granulometria da areia atende aos requisitos de faixa aceitável de areais para concretos. A areia não atende aos limites da NBR 7214 (ABNT, 2015). Contudo, destaca-se que a areia foi utilizada na granulometria encontrada após ser obtida no comércio local, evitando processos adicionais de preparação.

Figura 5: Curva granulométrica



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

### 3.2.2 Estudo de moagem do mármore

O mármore foi coletado, inicialmente em forma pastosa e seco em estufa a 100°C por 48 horas, até que a massa ficasse constante. Em seguida, foi realizado um destorramento forma manual de maneira que o resíduo passasse por inteiro na peneira de malha 1,2mm. O mármore foi moído em um moinho do modelo SL 36-21 produzido pela marca Solab (Figura 6).

Figura 6: Moinho de esferas SL 36-21



Fonte: Arquivo da autora (2025)

A moagem foi realizada de acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 3, esses parâmetros foram ajustados do estudo de moagem realizado por Paula *et al.* (2014).

Tabela 3: Parâmetros de moagem do material

Material	VM	VJ	VE	VR	TTM
	(cm <sup>3</sup> )	(cm <sup>3</sup> )	(cm <sup>3</sup> )	(rpm)	(min)
<b>Mármore</b>	3200	21000	1600	36	120

Legenda: TTM – Tempo total de moagem; VM – Volume de material; VJ – Volume do jarro; VE – Volume de esferas; VR – Velocidade de rotação;

Para a escolha das esferas, foram seguidas as recomendações do fabricante e a disponibilidade de esferas do laboratório, sendo assim, foram utilizadas 13 esferas com 4,15cm de diâmetro, 15 e 50 esferas com 3,70cm e 3,01cm de diâmetro respectivamente. Sendo a massa total das esferas 12,72 kg. Segundo Paula *et al.* (2014), o volume de esferas deve corresponder a 20% do volume total do jarro, porém, esse volume de esferas ultrapassa a recomendação de massa máxima estabelecida pelo fabricante do equipamento, por isso, adotou-se o volume de 1,6 litros, representando 7,6% do volume do jarro. O volume do mármore foi seguido pelo critério estabelecido por Paula *et al.* (2014), sendo adotado um volume de 1,5 vezes o volume de esferas, equivalente a 11,4 % do volume do jarro, com massa de 3,024 kg.

Com o material moído e coletado em diferentes tempos, foi executado ensaio de finura adaptado da NBR 15894-3 (ABNT, 2010). Inicialmente, pesou-se 20 g do material e misturou-se em 400 ml de água durante 10 minutos em agitador magnético. Em seguida, peneirou-se a mistura em peneira de malha 45  $\mu\text{m}$  um fluxo de água da torneira por um intervalo de 5 minutos, para que a água da torneira incida sobre toda a extensão da peneira, fez-se um movimento circular. O material retido foi transferido para um outro bêquer e seco em estufa a 100 °C. Então, após a secagem do material, cada amostra foi pesada para realização do cálculo da finura, estabelecida pela equação 1.

$$F_{45 \mu\text{m}} = c \times \frac{mf}{mi} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$F_{45 \mu\text{m}}$  é a finura representada pelo teor de resíduo retido na malha de 45  $\mu\text{m}$ , expressa em porcentagem (%). O resultado deve ser arredondado ao décimo mais próximo;

mi é a massa inicial da amostra expressa em gramas (g);

mf é a massa de resíduo retido na malha de 45  $\mu\text{m}$  após peneiramento via úmida e secagem em estufa (105  $\pm$  5) °C, expressa em gramas (g).

c fator de correção da peneira utilizada no ensaio, devendo estar compreendido no intervalo de 1,00  $\pm$  0,20. (Foi considerado igual a 1,00)

Com a amostra que obteve a finura inferior ao critério de parada, foi realizada análise de granulometria a laser, que também foi realizada no clinquer. Com objetivo de determinar a

distribuição de tamanho de partículas dos materiais. O ensaio foi conduzido em equipamento de difração a laser, que permite medir o diâmetro das partículas a partir da dispersão da luz incidente e parâmetros médios característicos (D10, D50 e D90).

Para o resíduo de mármore, utilizou-se água como meio de dispersão, associada a detergente líquido com dispersante. Já para o clínquer, empregou-se álcool isopropílico como meio dispersante, a fim de prevenir a hidratação das partículas em contato com a água, o que poderia comprometer a precisão dos resultados.

### 3.2.3 Difração de Raios X (DRX) e Fluorescência de Raios X

Foi realizada a preparação de amostras para DRX dos materiais utilizados na composição das argamassas: resíduo de mármore, clínquer e sulfato de cálcio. Para cada material, foi pesada uma amostra de aproximadamente 5 gramas, que foi triturada manualmente em almofariz com auxílio de pistilo. A moagem prosseguiu até que mais de 95% da massa passasse por uma peneira com abertura de 45  $\mu\text{m}$ , garantindo a granulometria adequada para a análise.

Para realização do DRX, o intervalo de varredura ( $2\theta$ ) foi de  $5^\circ$  a  $80^\circ$ , com incremento de  $0,018^\circ$  e tempo por passo de 1,5 segundos, totalizando 4124 passos e um tempo efetivo total de 6597 segundos. A tensão aplicada foi de 30 kV, com corrente de 10 mA. O tubo utilizado era de cobre, com comprimento de onda de 1,54184  $\text{\AA}$ , e o detector foi do tipo Lynxeye. A montagem da amostra foi realizada por meio do método *back-loading*.

A caracterização química do resíduo de mármore por fluorescência de raios X (FRX) utilizada foi baseada em resultados já publicados por Abreu *et al.* (2025), que realizou a análise do mesmo material.

Tabela 4: FRX - Resíduo de mármore

Composição química (%)	
Óxido	Materiais
	Mármore branco*

SiO <sub>2</sub>	6,2
MgO	21,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
CaO	29,9
SO <sub>3</sub>	-
K <sub>2</sub> O	-
TiO <sub>2</sub>	-
Na <sub>2</sub> O	
P.F.	41,5
Outros	0,2

Fonte: Abreu *et al.* (2025)

### 3.2.4 Moldagem dos corpos de prova

Para confecção dos corpos de prova foram separados, os moldes, a água, areia, clínquer, sulfato de cálcio e resíduos de mármore foram pesados nas proporções calculadas para cada traço, conforme a Tabela 5. Para facilitar desmoldagem foi utilizada uma camada de desmoldante Block nos moldes, que foi diluído na proporção volumétrica 1:4.

Tabela 5: Composição das argamassas

Material	Massa (g)			
	Argamassa Ref.	Argamassa 15%	Argamassa 25%	Argamassa 35%
Clinquer+ sulfato	949,17	806,79	711,87	616,96
Clinquer	901,71	766,45	676,28	586,11
Sulfato de cálcio	47,46	40,34	35,59	30,85
Mármore dolomítico		142,37	237,29	332,21
Areia	2847,49	2847,49	2847,49	2847,49
Água	455,60	455,60	455,60	455,60

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Então, iniciando a moldagem, misturou-se os materiais secos durante 1 minuto e foi acrescentada a quantidade de água calculada para que foi misturada de forma mecânica em velocidade baixa por 1 minuto. Posteriormente foi feita a raspagem com espátula no *bowl* durante 2 minutos e deixou-se a mistura descansar por mais 1 minuto. Novamente a argamassa

foi misturada mecanicamente por 3 minutos em velocidade alta e logo após foi feita raspagem da cuba por 1 minuto, então, foi realizada a última mistura mecânica em velocidade alta por 3 minutos finalizando a etapa de mistura da argamassa.

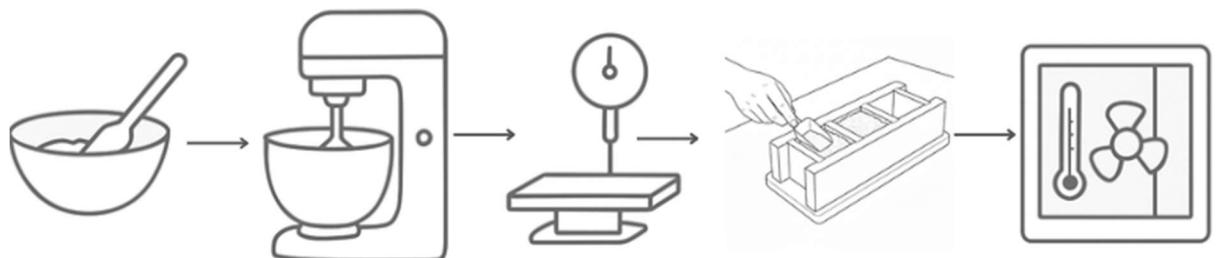
Após a formação de uma argamassa homogênea e coesa com as etapas da mistura, é realizado o teste de abatimento na *flow table*. Para realização do teste são seguidas as instruções da norma NBR 7215 (ABNT,2025). Inicialmente é passado um pano úmido na mesa e o tronco de cone é posicionado no centro da mesa de abatimento e é preenchido em três camadas iguais. Após a aplicação da primeira camada são aplicados 15 golpes, na segunda são aplicados 10 golpes e na terceira são aplicados 5 golpes. É realizada a raspagem do material que excede a borda do tronco de cone, e então ele é retirado e o operador deve realizar 30 golpes, sendo 1 golpe por segundo, garantindo que a mesa se move uniformemente.

Para finalizar é realizada a medição do espalhamento, são feitas 3 medidas de modo que as medidas, o índice de consistência da argamassa foi calculado como a média aritmética das medidas de três diâmetros e foi adotado o critério de interrupção do ensaio sempre que houver diferença maior que 10 mm entre as medidas, diferente da norma NBR 7215 (ABNT,2025), que estabelece que sejam feitas 2 medidas e adota 5 mm como a diferença máxima entre as medidas.

Com o teste de consistência executado, foram moldados 28 corpos de prova para cada traço. Para cada corpo de prova, a argamassa foi colocada em moldes de polietileno, com dimensões de 4x4x4 cm, secos em duas camadas iguais. Após a colocação de cada camada é realizado o adensamento com auxílio da mesa vibratória, com vibrações a 60Hz durante 30 segundos por camada. Foi realizada a limpeza da borda dos corpos de prova que posteriormente foram embalados com plástico filme e colocados em câmara climática a 20°C para o período de cura inicial.

Após 48 horas da moldagem, os corpos de prova são desmoldados com auxílio de um compressor de ar. Então os corpos de prova desmoldados submetidos à cura úmida em sacos plásticos com água em câmara climática à 20°C, até completar as idades de 7 e 28 dias de cura. Os processos descritos foram sintetizados na Figura 7.

Figura 7: Sequência de moldagem



Fonte: Elaborado pela autora

### 3.2.5 Ensaio à compressão dos corpos de prova

Foram realizados ensaios de compressão nos corpos de prova nas idades de 7 e 28 dias. Ao atingir a idade retirou-se os corpos de prova da câmara climática e foram medidas, com auxílio de paquímetro, as arestas do corpo de prova correspondentes à área em que a força de compressão foi aplicada. Os ensaios foram conduzidos em uma prensa hidráulica Intermetric seguindo a taxa de aplicação de carga especificada pela norma NBR 13279 (ABNT,2025), que estabelece um valor de 500 N/s

Figura 8: Rompimento do corpo de prova



Fonte: Arquivo da autora (2025)

A resistência à compressão foi calculada conforme a NBR 5739 (ABNT, 1994), conforme a equação 2

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Equação 02})$$

Em que:

$\sigma$  é a resistência a compressão

$F$  é a força máxima aplicada no ensaio

$A$  é a área superficial do corpo de prova

Após o cálculo da resistência, foi obtida a resistência média por meio da equação 03

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Em que:

$\bar{x}$  é a média das resistências

n é o número de corpos de prova

$x_i$  é a resistência individual do corpo de prova

$\Sigma$  é o somatório de valores

Então, com a média calculada, foi realizado o cálculo do desvio absoluto para avaliar a dispersão de resultados de cada uma das amostras com o auxílio da equação 3.

$$|x_i - \bar{x}| \quad (\text{Equação 03})$$

Comparou-se os desvios absolutos de cada amostra, para que o valor de resistência que apresentasse maior desvio absoluto fosse descartado, esse processo repetiu-se por três vezes, até que fosse obtido o valor médio das quatro amostras que representassem de forma mais precisa a resistência à compressão da argamassa estudada. Por fim, por meio da equação 4, foi calculado o desvio padrão amostral.

$$s = \sqrt{\left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right\}} \quad (\text{Equação 04})$$

Em que:

s é o desvio padrão amostral

Os cálculos foram realizados por meio do programa MS Excel, em formato de planilhas, como o exemplo da Tabela 15 de modo a facilitar o procedimento de análise dos resultados

Tabela 6: Exemplo de tabela utilizada para cálculo de resistência

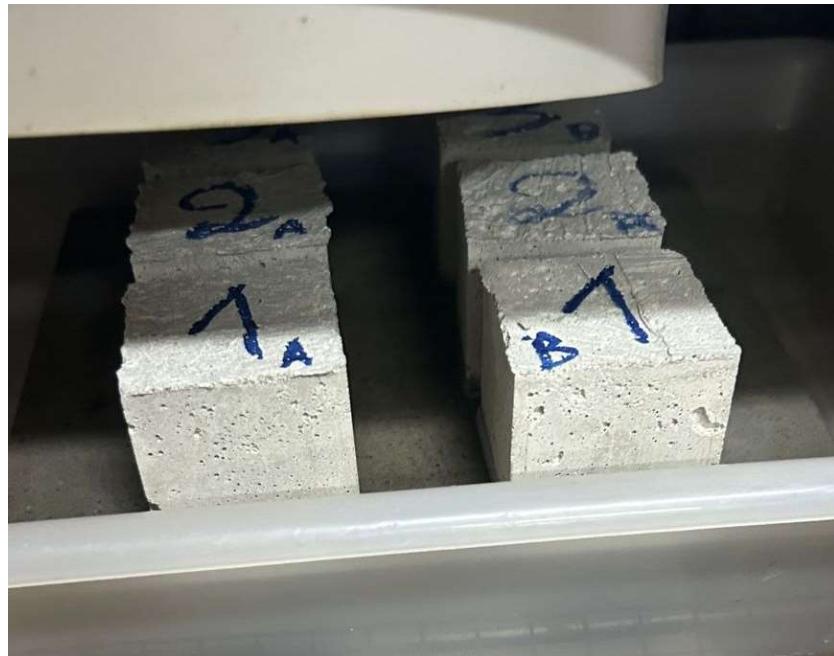
Rompimento de 7 dias - Traço de Referência								
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	Média
D1(mm)	40,3	40,75	40,68	40,46	40,09	40,48	40,32	
D2(mm)	39,61	40,41	40,05	40,88	39,96	41,02	39,94	
Área (cm <sup>2</sup> )	15,96	16,47	16,29	16,54	16,02	16,60	16,10	
F (KN)	26,4	25	22,9	28,4	21,2	20,6	18,9	
Tensão (Mpa)	16,54	15,18	14,06	17,17	13,23	12,41	11,74	14,33
Diferença	2,21	0,85	0,28	2,84	1,10	1,93	2,60	
Tensão (Mpa)	16,54	15,18	14,06		13,23	12,41	11,74	13,86
Diferença	2,68	1,32	0,20		0,63	1,45	2,12	
Tensão (Mpa)		15,18	14,06		13,23	12,41	11,74	13,32
Diferença		1,86	0,73		0,09	0,92	1,59	
Tensão (Mpa)			14,06		13,23	12,41	11,74	12,86
							Desvio	1,01

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

### 3.2.6 Ensaio de absorção por capilaridade

O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 15259 (ANBT, 2005). Quando os corpos de prova (CPs) atingiram as idades de 7 e 28 dias, foram secos em estufa à 100°C por 48 horas até alcançarem massa constante. Em seguida, os CPs foram posicionados em uma superfície com água, mantendo-se uma lâmina de 5 mm de altura, dentro de uma câmara climática (Figura 8) a 20°C. Foram registradas as massas dos corpos de prova nos seguintes intervalos: massa seca (após secagem em estufa), massa após 10 minutos de contato com a água e massa após 90 minutos de contato.

Figura 9: Ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: Arquivo da autora (2025)

Com base nos dados obtidos, foram realizados os cálculos de absorção de água por capilaridade, conforme estabelecido pela NBR 15259 (ABNT, 2025). Foi calculada a absorção de água por capilaridade, de acordo com a equação 5.

$$At = \frac{m_t - m_0}{A} \quad (\text{Equação 5})$$

Em que:

At é a absorção de água por capilaridade, para cada tempo, aproximada ao centésimo mais próximo, em gramas por centímetro quadrado;

$m_t$  é a massa do corpo de prova em cada tempo, aproximada ao centésimo mais próximo, em gramas;

$m_0$  é a massa inicial do corpo-de-prova, em gramas;

t corresponde aos tempos de 10 min e 90 min, em segundos;

A corresponde à área da superfície do corpo de prova, em centímetros quadrados.

### 3.2.7 Ensaio de Microtomografia Computadorizada (MCT) de argamassa

Aos 7 e 28 dias de cura, foram extraídas duas amostras cilíndricas de cada corpo de prova, pertencentes aos mesmos lotes utilizados nos ensaios de compressão e absorção de água. A extração foi realizada por meio de cortes úmidos com furadeira de bancada, com rotação de 350 rpm, conforme a Figura 10. Em seguida, realizou-se a interrupção da hidratação das amostras, que foram submersas em isopropanol por sete dias. O reagente foi renovado após 1 hora, 1 dia, 3 dias e 7 dias de imersão (Sun; Zunino; Scrivener, 2024). Após esse processo, as amostras foram armazenadas em uma *dry box* sob vácuo, até que fosse realizado ensaio de MCT.

Figura 10: Extração de amostra para realização de MCT



Fonte: Arquivo da autora (2025)

A microtomografia computadorizada (MCT) foi utilizada para a análise não destrutiva das amostras de argamassa, com o objetivo específico de determinar a porosidade total. O equipamento utilizado foi o Bruker Skyscan 1272 (Nanolab/RedeMat/UFOP), operando a 100Kv, com passo de rotação de 0,2° e range de 360°. As imagens tridimensionais obtidas foram processadas no software CTAn (CT-Analyser, Bruker), permitindo a quantificação do volume de vazios presentes na matriz cimentícia e a comparação entre os traços moldados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização inicial

A Tabela 7 apresenta o resultado da composição química dos materiais de partida obtida por FRX. Observou-se que o resíduo de mármore é composto predominante pelo óxido de cálcio (CaO), seguido do óxido de magnésio (MgO), sílica (SiO<sub>2</sub>) e óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), com MgO (%) + CaO (%) = 51,60% (Abreu *et al.*, 2025). Além disso, outros componentes químicos foram encontrados em menores quantidades. A elevada perda ao fogo pode ser atribuída à reação de descarbonatação da dolomita CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> → CaO+MgO+2CO<sub>2</sub> (Rodriguez *et al.*, 2012).

Tabela 7: Resultado do FRX: clínquer e mármore

Óxido	Composição química (%)	
	Materiais	
	Clínquer	Mármore branco*
SiO <sub>2</sub>	18,47	6,20
MgO	2,74	21,70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,52	0,50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,59	-
CaO	66,09	29,90
SO <sub>3</sub>	2,46	-
K <sub>2</sub> O	1,38	-
TiO <sub>2</sub>	0,24	-
Na <sub>2</sub> O	1,16	
P.F.	0,10	41,50
Outros	0,26	0,20

\*Abreu *et al.* (2025)

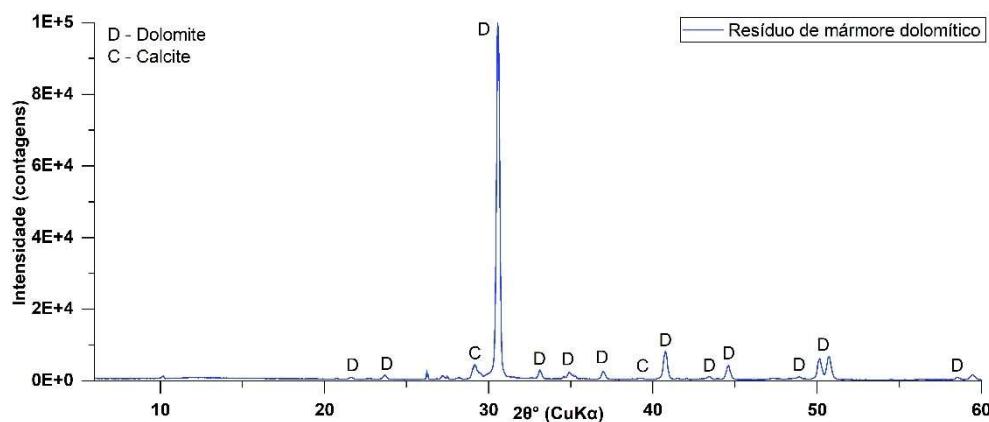
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A composição química do clínquer analisado revela que a quantidade óxidos estão dentro dos intervalos recomendados pela literatura. O teor de óxido de cálcio (CaO), é de 66,09%, valor compatível com a faixa de 60–67% indicada por Neville (2016). O teor de sílica (SiO<sub>2</sub>) é de 18,47%, enquadrando-se no intervalo de 17–25% (Neville, 2016). Os teores de

$\text{Al}_2\text{O}_3$  (4,52%) e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (2,59%) também se encontram dentro dos limites de 3–8% e 0,5–6,0%, respectivamente, assim como os teores de  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{SO}_3$  também apresentam valores que atendem os limites usuais propostos pelo autor. Esses dados confirmam que o clínquer utilizado apresenta uma composição química típica e compatível com padrões usuais de qualidade estabelecido por Neville (2016).

Foi realizada a análise do resíduo de mármore por meio da difração de raio X, com intuído de identificar sua composição mineralógica. O resultado da análise está apresentado na Figura 11

Figura 11: DRX do resíduo de mármore



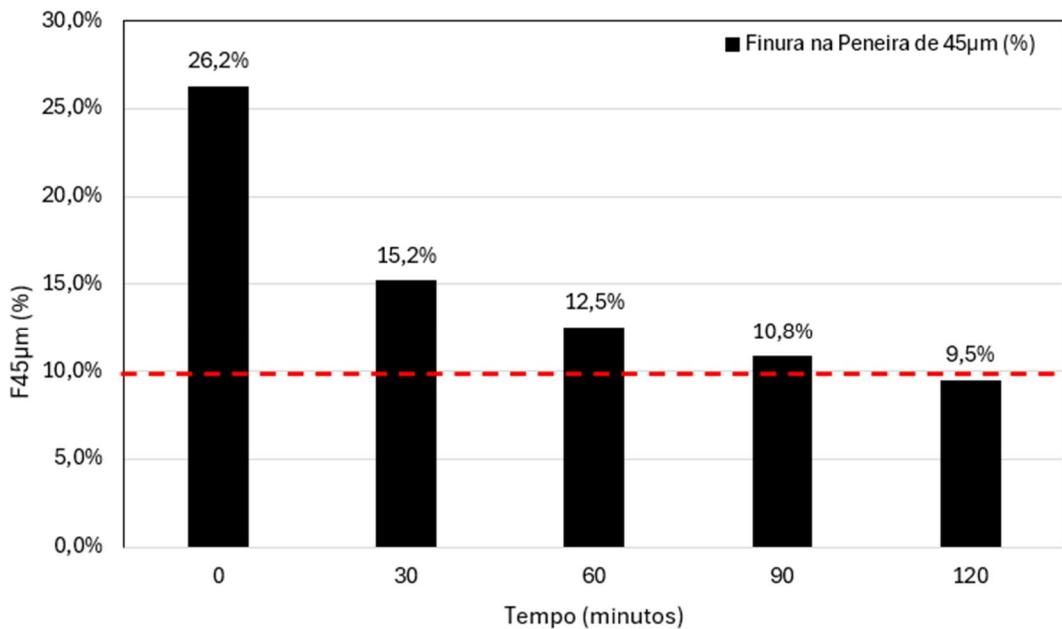
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

O difratograma obtido apresenta picos intensos de dolomita ( $\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$ ) e alguns picos de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), também identificados nos trabalhos de Carvalho *et al.* (2023) e Cruz (2019), confirmando a predominância dolomítica do material.

#### 4.2 Estudo de moagem

Realizou-se um estudo preliminar para determinar o tempo ótimo de moagem do resíduo de mármore, adotando como critério de parada a obtenção de, no máximo, 10% de material retido na peneira de  $45\text{ }\mu\text{m}$ . O resultado da finura em cada tempo de moagem está representado na Figura 12.

Figura 12: Gráfico de Finura x Tempo de moagem



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A análise do gráfico indicou que a moagem do resíduo de mármore foi mais eficiente nos primeiros 30 minutos com redução de 11% da fração retida na peneira de 45  $\mu\text{m}$ . A redução da fração retida ocorreu de forma mais lenta entre 30 e 120 minutos de moagem. O critério de parada, estabelecido como 10% de material retido na peneira de 45  $\mu\text{m}$ , foi atingido apenas aos 120 minutos. Em relação ao desempenho, a moagem de 30 minutos apresentou um bom resultado exigindo menos consumo energético, porém considerando que estudos apontam o material como atuante no efeito filer (Almada *et al.*, 2022), optou-se pela moagem que proporcionou a menor finura do material. Como a finura do material colabora com as propriedades de empacotamento e aumento de pontos de nucleação na argamassa, optou-se por aprofundar a análise da distribuição granulométrica, foi realizado um ensaio de granulometria a laser, e os resultados estão dispostos na Tabela 8.

Tabela 8: Granulometria do Resíduo de mármore e do Clínquer

<b>Material</b>	<b>Granulometria a laser</b>					<b>Finura # 45 <math>\mu\text{m}</math></b>	
	Dispersante	$D_{v,10}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{v,50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{v,90}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_m$ ( $\mu\text{m}$ )	Agente dispersante	% retido
Mármore Branco	Água com detergente	1,047	6,868	39,100	15,672	Água	9
Clínquer	Álcool Isopropílico	2,896	17,360	66,550	28,935	-	-

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

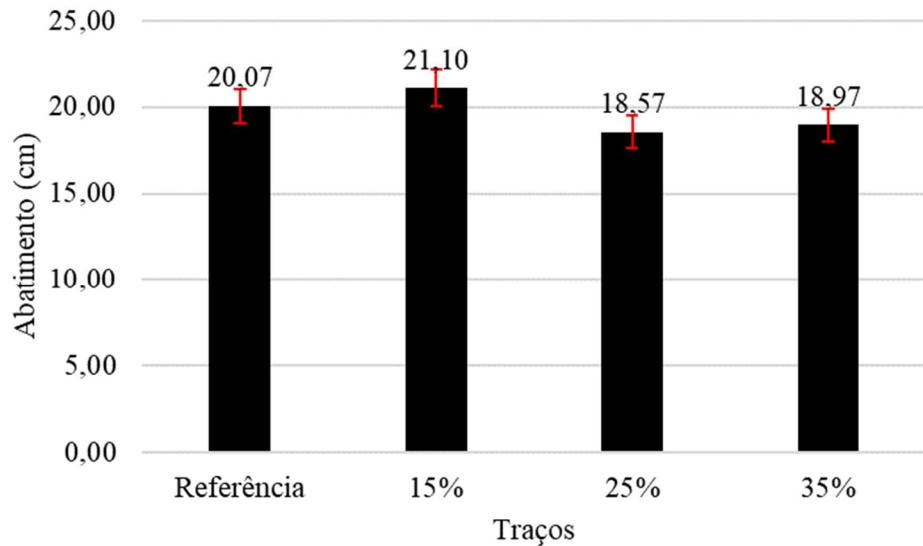
De acordo com Gomes (2010), os parâmetros D10 e D90 correspondem aos diâmetros de corte da curva de distribuição em 10% e 90%, respectivamente. O D10 representa o diâmetro abaixo do qual estão 10% das partículas, indicando o limite da fração mais fina da amostra, enquanto o D90 corresponde ao diâmetro abaixo do qual estão 90% das partículas (Pagio *et al.*, 2021). Já o parâmetro D50 representa a mediana da distribuição granulométrica. Observando as distribuições granulométricas, é possível verificar que D10 e D50 do resíduo apresentam valores menores do que o do clínquer. Sendo assim, o material apresentará maior área superficial, e poderá contribuir para um melhor empacotamento das partículas, complementando a distribuição granulométrica e promovendo o preenchimento dos poros por sua atuação como material filer (Carmo, 2014).

### 4.3 Caracterização da argamassa

#### 4.3.1 Argamassa no estado fresco – Determinação do índice de consistência

Logo após a moldagem, foi realizado o ensaio de determinação do índice de consistência utilizando a mesa de fluxo (*flow table*), afim de medir o abatimento da argamassa em estado fresco. Os resultados foram apresentados na Figura 13.

Figura 13: Gráfico de Abatimento x Traços



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Foi observado que, com a substituição de 15% resíduo de mármore nas argamassas, houve um aumento da fluidez, já para substituições maiores consistência da mistura aumentou. Nesse sentido, o índice de consistência teve uma variação de  $-1,50 \leq \Delta IC \leq 1,03$  cm, não apresentando alterações expressivas quando comparado com a argamassa de referência. Sendo assim, a possibilidade do uso de plastificantes foi descartada.

#### 4.3.2 Ensaio de Resistência à Compressão

Após 7 e 28 dias de cura, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão. Ao todo, foram ensaiadas 56 amostras, sendo 14 para cada teor de substituição utilizado e destas, 7 para cada idade. Após a exclusão de dados que não representam bem a amostra, excluindo as amostras com maior desvio relativo (NBR 7215, 2025), obteve-se o resultado médio das resistências para cada traço, conforme apresentado na Tabela 9 e ilustrados na Figura 14.

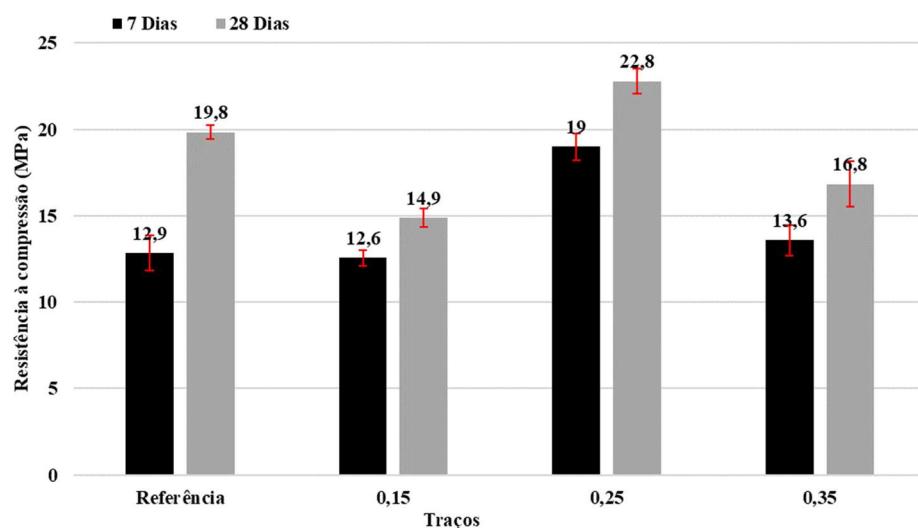
Tabela 9: Resultado médio da resistência à compressão

Traços	Resistência à Compressão (Mpa)	Desvio padrão amostral	Desvio percentual
Ref. 7D	12,86	1,01	7,83%
15% 7D	12,56	0,45	3,60%
25% 7D	18,99	0,79	4,15%
35% 7D	13,59	0,90	6,60%
Ref. 28D	19,84	0,42	2,11%
15% 28D	14,89	0,54	3,60%
25% 28D	22,80	0,72	3,17%
35% 28D	16,84	1,33	7,87%

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

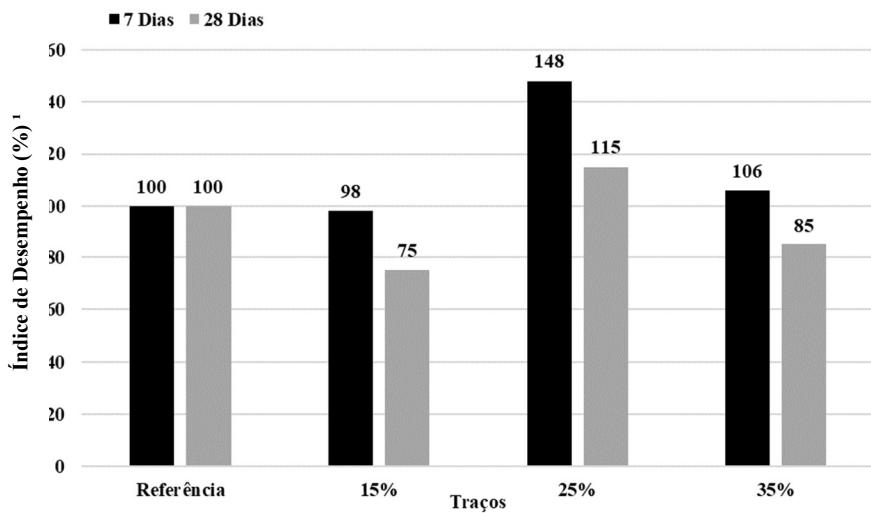
A partir das Figuras 13 (a) e (b), observa-se que todos os traços apresentaram aumento da resistência média à compressão com o avanço da idade de cura, de 7 para 28 dias, comportamento típico de materiais cimentícios. Esse crescimento está relacionado à continuidade do processo de hidratação do cimento ao longo do tempo, conforme descrito por Neville (2016), e também de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), que aborda a evolução da resistência do concreto com a idade, especialmente sob condições adequadas de cura.

Figura 14 (a): Gráfico de Resistência à compressão x Traços



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Figura 14 (b): Gráfico de Índice de desempenho x Traços



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Em relação ao traço de referência (0% de adição), aos 7 dias de idade, as argamassas com 25% e 35% de substituição de resíduo de mármore apresentaram ganhos médios de resistência de 48% e 6%, respectivamente, porém o traço de 15% de substituição apresentou diminuição da resistência em 2%. Nesse sentido, sugere-se que os traços com 15% e 35% de substituição possuem resistências médias comparáveis ao traço de referência, enquanto o traço com 25% mostrou aumento relevante da resistência. Já aos 28 dias de idade, a diferença de resistência em relação ao traço de referência foi de 15% para a argamassa com 25% de substituição e os traços de 35 e 15% apresentaram perda na resistência mecânica quando comparados com o traço de referência.

Os resultados confirmam que a substituição parcial de 25% do material utilizado contribuiu significativamente para o desempenho mecânico da argamassa. Singh *et al.* (2017) observou o aumento na resistência à compressão de argamassas com 10% de substituição do cimento, segundo ele o aumento é devido ao efeito de micropreenchimento do resíduo, consequência da ação do resíduo como efeito filer. A ampla revisão desenvolvida por Tunc *et al.* (2019) também concluiu que o teor de 10% apresentou aumento na resistência, sendo o teor ideal para substituição. De forma similar, Ruiz *et al.*, (2019) concluiu que a resistência à

<sup>1</sup> O índice de desempenho da argamassa é a porcentagem obtida pela razão entre a resistência do traço analisado e a resistência de referência.

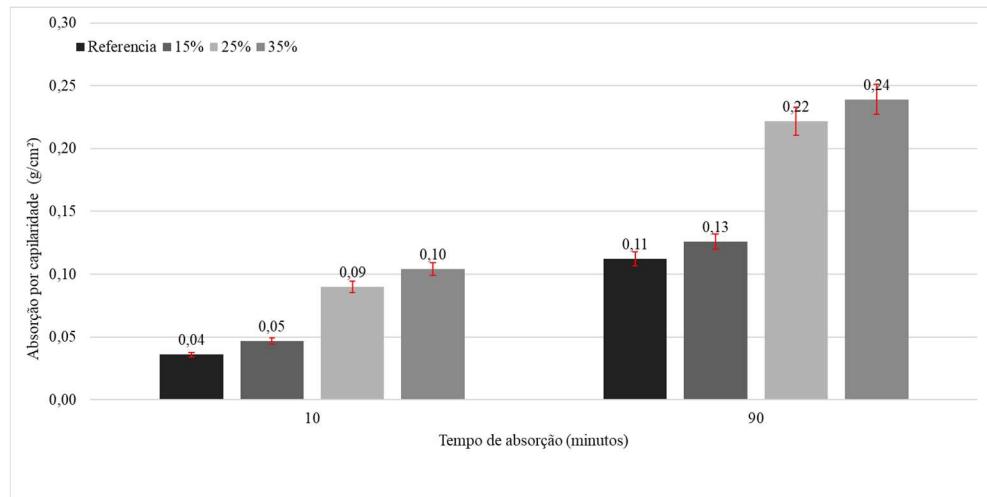
compressão é maior em amostras com adições percentuais de até 10% do que na série de controle.

Dessa maneira, os resultados obtidos estão em consonância a literatura, indicando que teores moderados de substituição, podem ser vantajosos para a resistência à compressão da argamassa, mesmo na ausência de atividade pozolânica. Todavia, destaca-se que o melhor desempenho à compressão foi obtido com um teor superior ao observado em trabalhos anteriores, o que ressalta a relevância do material para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

#### 4.3.3 Ensaio de Absorção por Capilaridade

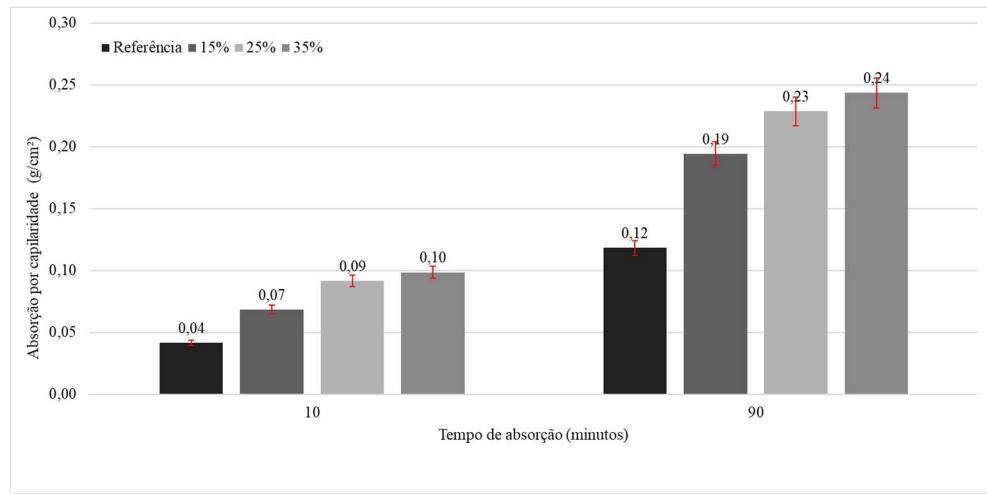
As Figura 15 (a) e (b) apresentam os resultados do ensaio de absorção por capilaridade nos tempos de 10 e 90 minutos, considerando traços com substituições parciais do cimento por resíduo de mármore de 15%, 25% e 35%, além do traço de referência. Nota-se que a absorção aumenta com o tempo e com o teor de substituição.

Figura 15 (a): Gráfico de absorção por capilaridade aos 7 dias x Tempo de absorção



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Figura 15 (b): Gráfico de absorção por capilaridade aos 28 dias x Tempo de absorção



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Os resultados indicam que o aumento do teor de substituição do cimento por pó de mármore promove um aumento na absorção de água por capilaridade. Percebe-se que os maiores valores de absorção ocorreram nas amostras com 25% e 35% de substituição, especialmente após 90 minutos de ensaio. Esse aumento pode estar relacionado ao maior teor de porosidade introduzido pelo resíduo, o que favorece a migração da água por capilaridade.

Embora o resíduo apresente elevada finura, o que teoricamente contribuiria para o efeito filer e a melhoria no empacotamento das partículas, a substituição provocou um aumento da

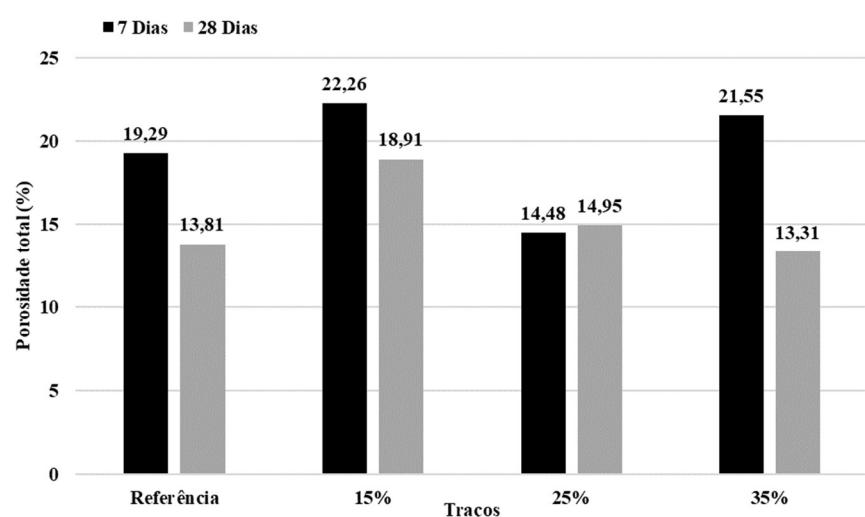
absorção. Esses resultados são coerentes com os achados de Lezzerini *et al.* (2019), que observaram aumento na absorção capilar em argamassas contendo resíduos de mármore como substituto do cimento. Segundo os autores, a maior absorção está associada ao aumento da porosidade da matriz endurecida, especialmente em substituições superiores a 20%.

Contudo, Mehta e Monteiro (2014) destacam que a absorção de água por capilaridade em concretos é determinada não apenas pelo volume total de poros, mas sobretudo pela conectividade entre os poros capilares, que permite o transporte contínuo de água por sucção capilar. Sendo assim, nota-se que pelo aumento da absorção de água, os traços com maiores substituições absorveram mais água, o que poderia indicar a presença de poros interconectados, possibilitando o ingresso de água e contribuindo negativamente com a durabilidade do compósito.

#### 4.3.4 Micro Tomografia – Porosidade total

A Figura 16 apresenta os resultados de porosidade total, obtidos através do ensaio de microtomografia nas idades de 7 e de 28 dias.

Figura 16: Gráfico de porosidade total x Traços



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Aos 7 dias, a substituição de 15% e 35% resultaram em maior porosidade total que a referência, indicando uma estrutura ainda pouco densa. A argamassa com 25% de substituição se destacou por apresentar baixa porosidade precoce e estabilidade ao longo da cura, o que pode estar relacionado a um melhor empacotamento das partículas.

O resultado de porosidade total apresenta uma relação justificável quando comparado com os dados de resistência à compressão, evidenciando um comportamento coerente entre ambos os ensaios. Observa-se que o traço com 25% de substituição apresentou o menor índice de porosidade aos 7 e 28 dias, o que reforça a ideia de uma microestrutura mais densa. Esse resultado reforça a perspectiva inicial de que o teor de 25% poderia proporcionar maiores valores de resistência devido à redução do índice de vazios na argamassa.

Por outro lado, os resultados de porosidade total não apresentam uma relação direta com os valores obtidos no ensaio de absorção por capilaridade. Embora o traço com 25% de substituição tenha apresentado a menor porosidade total, seus índices de absorção foram superiores aos da referência em ambos os tempos de ensaio (10 e 90 minutos). Isso sugere que, apesar de a argamassa possuir um menor volume de poros, esses poros podem estar mais interconectados, favorecendo o transporte de água por capilaridade

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade da utilização do resíduo de mármore branco dolomítico como material filer em substituição parcial ao cimento Portland na formulação de argamassas. A pesquisa envolveu a preparação do resíduo por meio secagem e moagem em moinho de bolas, seguida de caracterização por FRX, DRX e análise granulométrica, bem como moldagem e ensaios de compressão, absorção por capilaridade e micro tomografia em argamassas com teores de substituição de 0%, 15%, 25% e 35%. Esses procedimentos permitiram avaliar, de forma integrada, a influência do resíduo na consistência, na microestrutura e na resistência mecânica das argamassas.

As análises mineralógicas e químicas confirmaram a predominância de dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) e elevadas concentrações de cálcio e magnésio no material estudado. A moagem por 120 minutos mostrou-se adequada para promover uma granulometria mais fina que a do clínquer, que pode favorecer o efeito filer por meio de maior empacotamento granular e redução de vazios. Essa característica foi determinante para a manutenção da trabalhabilidade das argamassas sem a necessidade de aditivos plastificantes.

Os resultados mecânicos indicaram que, aos 7 dias, o índice de desempenho das argamassas com o resíduo variou entre 98% e 148% em relação à argamassa de referência, sugerindo que algumas formulações com adição do resíduo apresentam ganho de resistência inicial. Aos 28 dias, o índice situou-se entre 75% e 115%, mostrando que, embora haja variação conforme o teor de substituição, as argamassas com resíduo de mármore podem alcançar desempenhos comparáveis aos das argamassas convencionais.

Verificou-se que a absorção por capilaridade aumentou com a elevação do teor de substituição, indicando que, com a redução na quantidade de cimento, houve uma tendência de aumento na conectividade entre os poros, favorecendo o transporte de água por capilaridade. A microtomografia por raios X (micrCT) mostrou porosidade volumétrica total na faixa de 14% a 22% aos 7 dias e de 13% a 19% aos 28 dias, indicando uma porosidade total da microestrutura compatível com argamassas tradicionais.

Do ponto de vista mecânico, o teor de 25% de substituição foi identificado como o mais indicado para a substituição parcial do cimento, pois apresentou o melhor equilíbrio entre resistência à compressão, porosidade total e absorção por capilaridade. Esse desempenho sugere que o resíduo de mármore atua como um material de preenchimento eficiente, capaz de otimizar a microestrutura da argamassa sem prejudicar a formação do compósito cimentício, resultando em um produto com propriedades adequadas para aplicações convencionais na construção civil.

Apesar dos resultados positivos, é importante reconhecer algumas limitações e indicar caminhos para futuros avanços. Uma sugestão para trabalhos futuros seria criar um programa amplo de avaliação microestrutural de modo a acompanhar como a microestrutura muda ao longo do tempo, incluindo a realização de análise estatística aprofundada com métodos como análise de variância regressão, com intuito de diagnosticar as relações entre os ensaios.

## 6 REFERENCIAS

ABIROCHAS. **Informe 01/2024: Balanço de 2023.** [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <[https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2024/03/Informe-01\\_2024-Balanco-2023.pdf](https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2024/03/Informe-01_2024-Balanco-2023.pdf)>. Acesso em: 17 out. 2024.

ABREU, U. A.; RUIZ, M. S.; CARUSO, L. G. **Perfil 7 – Rochas dimensionadas e aparelhadas.** In: RUIZ, M. S.; NEVES, M. R. (Coord.). Mercado produtor mineral do estado de São Paulo. São Paulo: I.P.T., 1990. p. 137-151.

ABREU, S. F.; FERREIRA, M. H. D. Co.; MOURA, C. A. M.; CARVALHO JÚNIOR, J. A.; RAMOS, G. D.; SILVA, G. J. B. **Influência do teor de sílica reativa na resistência mecânica de matrizes geopoliméricas produzidas com resíduos de mármore branco e pó de vidro.** In: II Simpósio Brasileiro de Ciência do Cimento, 2., 2025, São Paulo. Anais... São Paulo, 2025.

ALIABDO, A. A.; ELMOATY, A. E. M. A.; ABDELBASSET, M. M. **Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete.** Construction and Building Materials, Amsterdam, v. 50, p. 28-41, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.002>.

ALMADA, B. S.; SANTOS, W. J.; SOUZA, S. R.. **Marble and granite waste as mineral addition in mortars with different water-cement ratios.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 22, n. 4, p. 445-462, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212022000400624>.

ALMEIDA, T. F.; DELATORRE, A. B.; MÔTHE, G. P. B.; AGUIAR, C. J. **Caracterização do resíduo de mármore calcinado para utilização como fonte alternativa de carbonato de cálcio.** [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <<https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2019/V-046.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2024.

ARUNTAŞ, H. Y.; GÜRÜ, M.; DAYI, M.; TEKİN, İ. **Utilization of waste marble dust as an additive in cement production.** Materials & Design, v. 31, n. 8, p. 4039-4042, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.03.036>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e solos – Terminologia.** Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 1004: resíduos sólidos – classificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217: agregados – determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: agregados para concreto – especificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

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.** Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: projeto de estruturas de concreto — procedimentos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

BARDINI, V. S. S.; KLINSKY, L. M. G.; FERNANDES JUNIOR, J. L. **Influence of mineral filer on volumetric properties of hot mix asphalt.** Road Materials and Pavements Design, v. 14, p. 15-27, 2013.

BENJEDDOU, O.; ALYOUSEF, R.; MOHAMMADHOSSEINI, H.; SOUSSI, Chokri; KHADIMALLAH, M. A.; ALABDULJABBAR, H.; MD. TAHIR, M.. **Utilisation of waste marble powder as low-cost cementing materials in the production of mortar.** Journal of Building Engineering, v. 32, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101642>.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração (ANM). **Sumário mineral brasileiro 2012**. Brasília: ANM, 2012. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2012>>. Acesso em: 23 out. 2023.

BRASIL. Ministério do Trabalho. **Portaria nº 43, de 28 de março de 2008**. Dispõe sobre a criação do Cadastro Nacional de Aprendizagem Profissional. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 mar. 2008.

CAMPOS, A. R.; CASTRO, N. F.; VIDAL, F. W. H.; BORLINI, M. C. **Tratamento e aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais e de revestimento, visando mitigação de impacto ambiental**. In: 23º Simpósio de Geologia do Nordeste, 2009, Fortaleza. Anais. Fortaleza: CETEM – MCT, 2009. p. 10-18.

CARMO, E. A. A. **Influência da adição do resíduo proveniente do corte de mármore e granito (RCMG) nas propriedades de argamassas de cimento Portland**. 2014. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

CARVALHO, A. R. de; SILVA JÚNIOR, G. da; FONTES, W. C.; SILVA, G. J. B.; PEDROTI, L. G.; OLIVEIRA, T. M. de. **Influência do efeito filer do pó de mármore na produção de concretos para pavimentos intertravados**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 23, n. 4, p. 217-239, out./dez. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000400700>.

CRUZ, A. C. F. **Caracterização do resíduo de corte de mármore e granito de marmoraria e análise da viabilidade de substituição parcial do cimento Portland para produção de pavers**. 2019. 64 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, Volta Redonda, 2019.

DEMARTINI, T. J. C. **Estudo e aplicação de materiais compósitos em engenharia de materiais**. 2013. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2013. Disponível em: <<https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp->>

content/uploads/sites/2/2013/07/Dissertação-mestrado-FINAL-Tcharllis-João-da-Cunha-Demartini.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2025.

Gomes, M. C. V., Sampaio, J. A., & Guzzo, P. L. (s.d.). **Análise do efeito do tamanho de partícula na resposta termoluminescente do quartzo natural (Relatório de Iniciação Científica).** CETEM - Centro de Tecnologia Mineral. Disponível em: [http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/552/1/Marcos\\_Gomes.pdf](http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/552/1/Marcos_Gomes.pdf)

LEZZERINI, M.; LUTI, L.; AQUINO, A.; GALLELLO, G.; PAGNOTTA, S. **Effect of marble waste powder as a binder replacement on the mechanical resistance of cement mortars.** Applied Sciences, v. 12, p. 4481, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12094481>.

LI, L. G.; HUANG, Z. H.; TAN, Y. P.; KWAN, A. K. H.; LIU, F. **Use of marble dust as paste replacement for recycling waste and improving durability and dimensional stability of mortar.** Construction and Building Materials, [S.l.], v. 166, p. 423-432, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.154>.

LOHAR, J.; SHRIVASTAVA, N.. **Feasibility of marble processing waste as non-conventional fill in geotechnical applications.** Materials Today: Proceedings, [S.l.], v. 97, p. 346-353, 2024. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/382693973\\_Feasibility\\_of\\_Marble\\_Processing\\_Waste\\_as\\_Non-conventional\\_Fill\\_in\\_Geotechnical\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/382693973_Feasibility_of_Marble_Processing_Waste_as_Non-conventional_Fill_in_Geotechnical_Applications)>. Acesso em: 20 jul. 2025.

LUZ, A. B. da; LINS, F. F. (eds.). **Rochas e minerais industriais – usos e especificações.** Rio de Janeiro: CETEM – MCT, 2005. 363 p.

MACHADO, F. B.; MOREIRA, C. A.; ZANARDO, A.; ANDRE, A. C.; GODOY, A. M.; FERREIRA, J. A.; GALEMBECK, T.; NARDY, A. J. R.; ARTUR, A. C.; OLIVEIRA, M. A. F. **Enciclopédia multimídia de minerais [online].** 2015. ISBN: 85-89082-11-3. Disponível em: <inserir link se houver>. Acesso em: mar. 2025.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials.** 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

MENDONÇA, A. M. G. D.; DUARTE, E. V. N.; LIRA, Y. C.; SILVA, C. C. Vitorino P.; LUZ, T. E. B.; GUERRA, T. D.; PEREIRA, P. H. S.; DINIZ, M. I. L. **Utilização do resíduo**

**de mármore na produção de argamassa.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 7, n. 5, p. 44238-44247, maio 2021.

**NADALIN, L. Caracterização tecnológica de marmores ornamentais da Formação Votuverava, Supergrupo Açungui, região de Tunas do Paraná, PR.** Curitiba: UFPR, 2017. Disponível em: <https://geologia.ufpr.br/wp-content/uploads/2017/01/luiznadalin.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2025.

**NEVILLE, A. M. Tecnologia do concreto.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. E-book. p. 278. ISBN 9788582600726. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788582600726/>>. Acesso em: 01 jul. 2025.

**NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. ISBN 9788582603666. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788582603666/>>. Acesso em: 26 jun. 2025.

**PAGIO, M. Z.; CARRARETO, L. F.; VIEIRA, G. L.; MAGALHÃES, D. C. Caracterização de resíduos siderúrgicos visando à aplicação em matrizes cimentícias.** Ambiente Construído, 2021.

**PAULA, L. F. de; ALVES, A. C.; ALVES, H. C. S.; RIBEIRO, E. A.; MADURRO, A. G. B.; MADURRO, J. M. Diretrizes para a construção de um moinho de bolas para a moagem de sólidos em laboratórios.** Química Nova, v. 37, n. 4, p. 1083-1087, 2014. Disponível em: <<https://quimicanova.sbj.org.br/pdf/v37n4a25.pdf>>. Acesso em: 07 ago. 2025.

**PONTES, I. F. Aproveitamento de finos gerados nas serragens de marmores e granitos.** 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. DOI: 10.11606/T.3.2001.tde-01072024-100629. Acesso em: 12 mai. 2025.

**RANA, A; KALLA, P; CSETENYI, L. J. Sustainable use of marble slurry in concrete.** Journal of Cleaner Production, v. 94, p. 304-311, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652615000578>>.

RODRIGUEZ-NAVARRO, C.; KUDLACZ, K.; RUIZ-AGUDO, E. **The mechanism of thermal decomposition of dolomite: New insights from 2D-XRD and TEM analyses.** American Mineralogist, v. 97, p. 38-51, 2012. DOI: <<http://dx.doi.org/10.2138/am.2011.3813>>.

RUÍZ-SÁNCHEZ, A.; SÁNCHEZ-POLO, M.; ROZALÉN, M. **Waste marble dust: An interesting residue to produce cement.** Construction and Building Materials, v. 224, p. 99-108, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.031.

SANTANA, J. A.; NASCIMENTO, L. S.; NUNES, R. **Js. Estudo da influência do uso de resíduos de marmoraria no desempenho de concretos.** Revista Tecnológica, Presidente Prudente, v. 32, n. 1, 2023. DOI: 10.4025/revtecnol.v32i1.65896.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials.** Boca Raton: CRC Press, 2016.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. **Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub>, cement-based materials industry.** Cement and Concrete Research, v. 114, p. 2-26, 2018.

SINGH, M.; SRIVASTAVA, A.; BHUNIA, D. **An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry.** Construction and Building Materials, v. 134, p. 471-488, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com.ez28.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0950061816320736?via%3Dihub>>. Acesso em: 19 jun. 2024.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2023.** Brasília: SNIC, 2024. Disponível em: <[http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio\\_anual/1732731328.pdf](http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/1732731328.pdf)>. Acesso em: 16 jul. 2025.

SILVA, R. B. et al. **Potencial de utilização do resíduo de mármore em matrizes cimentícneas.** Revista Matéria, v. 23, n. 2, 2018. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rmat/a/XqQJ5JZ5v5mQ8Jk5JQ5JQ5JQ/>>.

SINDIROCHAS - Sindicato da Indústria de Rochas Ornamentais, Cal e Calcários do Estado do Espírito Santo. **Manual de rochas ornamentais: características, usos e aplicações,**

2013. Disponível em: <<https://www.sindirochas.com/arquivos/manual-rochas.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2024.

SOOMRO, M; TAM, V W. Y.; EVANGELISTA, A. C. J. Production of cement and its environmental impact. In: TAM, Vivian W. Y.; SOOMRO, Mahfooz; EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge (ed.). **Recycled concrete. Woodhead Publishing: Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering**, 2023

SOUZA, L. R.; RIBEIRO, R. C. C.; CARRISSO, R. C. C.; SILVA, L. P.; PACHECO, E. B. A. V.; VISCONTE, L. L. Y. **Aplicação de resíduos de mármore na indústria polimérica. Série tecnologia ambiental**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. 36 p.

SUN, J; ZUNINO, F; SCRIVENER, K. **Hydration and phase assemblage of limestone calcined clay cements (LC<sup>3</sup>) with clinker content below 50%. Cement and Concrete Research**, v. 177, p. 107417, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107417>.

TAZZINI, A; GAMBINO, F; CASALE, M; DINO, G. A. **Circular economy in extractive industry: challenge and chance to recover fine particles produced in marble quarries exploitation**. Apresentado em: EGU General Assembly 2024, Viena, Áustria, 14–19 abr. 2024. Resumo n.º EGU24-652.

THAKUR, A; PAPPU, A; THAKUR, V. K. **Resource efficiency impact on marble waste recycling towards sustainable green construction materials**. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, v. 13, p. 91-101, out. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.06.005>.

TUNC, E. T. **Recycling of marble waste: A review based on strength of concrete containing marble waste**. Journal of Environmental Management, v. 231, p. 86-97, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.034>.

YAMANEL, K; DURAK, U; İLKENTAPAR, S; ATABEY, I; KARAHAN, O; DURAN, C. **Influence of waste marble powder as a replacement of cement on the properties of mortar**. Revista de la Construcción. Journal of Construction, v. 18, n. 2, p. 290-300, ago. 2019. DOI: <https://doi.org/10.7764/RDLC.18.2.290>.

**YURDAKUL, M. Natural stone waste generation from the perspective of natural stone processing plants: An industrial scale case study in the province of Bilecik, Turkey.**  
Journal of Cleaner Production, v. 276, art. 123339, dez. 2020. DOI:  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123339>.