



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

RYAN TEIXEIRA MACÊDO

**POTENCIAL DO RESÍDUO DE CORTE DE MÁRMORE E GRANITO COMO
MATÉRIA-PRIMA ALTERNATIVA PARA ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

**JOÃO PESSOA
2025**

RYAN TEIXEIRA MACÊDO

**POTENCIAL DO RESÍDUO DE CORTE DE MÁRMORE E GRANITO COMO
MATÉRIA-PRIMA ALTERNATIVA PARA ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia, da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Augusto Gomes Neto

**JOÃO PESSOA
2025**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M141p Macêdo, Ryan Teixeira.

Potencial do resíduo de corte de mármore e granito como matéria-prima alternativa para argamassas de revestimento / Ryan Teixeira Macêdo. - João Pessoa, 2025.

62 f. : il.

Orientação: José Augusto Gomes Neto.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. RCMG. 2. Resíduo. 3. Sustentabilidade. I. Gomes Neto, José Augusto. II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 624(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

RYAN TEIXEIRA MACÊDO

**POTENCIAL DO RESÍDUO DE CORTE DE MÁRMORE E GRANITO COMO
MATÉRIA-PRIMA ALTERNATIVA PARA ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso em 30/09/25, perante a seguinte Comissão

Julgadora:

José Augusto Gomes Neto

Prof. Dr. José Augusto Gomes Neto
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do
CT/UEPB

APROVADO

Cibelle Guimarães Silva Severo

Profa. Dra. Cibelle Guimarães Silva Severo
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do
CT/UEPB

APROVADO

Leonardo Medeiros da Costa

Prof. Dr. Leonardo Medeiros da Costa
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do
CT/UEPB

APROVADO

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela dádiva da vida, pela força e pela sabedoria concedidas em todos os momentos desta caminhada acadêmica.

À minha família, pelo amor incondicional, pelo apoio constante e por sempre acreditarem no meu potencial, mesmo diante das dificuldades.

À minha namorada, pela paciência, incentivo e companheirismo durante todas as etapas de elaboração deste trabalho.

Ao meu professor orientador, pela orientação, disponibilidade, dedicação e pelas contribuições valiosas para a realização deste trabalho.

Aos técnicos do LABEME e alunos do programa de pós graduação de Engenharia Civil, pelo auxílio na realização dos ensaios laboratoriais, cuja colaboração foi fundamental para a execução desta pesquisa.

Às empresas Millenium Mármore e Granitos, Conserpa & Enger e Mix Blocos, pelo fornecimento dos insumos necessários para o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso, demonstrando apoio e parceria à pesquisa acadêmica.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste objetivo, deixo registrado meu sincero agradecimento.

RESUMO

Na atualidade, são descartados no meio ambiente grandes quantidades de resíduos sólidos, causando grandes impactos ambientais. Um desses resíduos é o de corte de mármore e granitos (RCMG). Sendo assim, este trabalho avaliou a viabilidade técnica e econômica do uso do resíduo do corte de mármore e granito como substituto parcial do agregado e aglomerante em argamassas de revestimento. O estudo foi motivado pela necessidade de reduzir o consumo de recursos não renováveis, como areia e cimento, e de dar destinação adequada aos rejeitos da indústria de rochas ornamentais. Para isso, foram produzidos traços experimentais com substituições parciais de areia em 10%, 20% e 30% e de cimento em 10% pelo resíduo fino, submetidos a ensaios no estado fresco e endurecido. Os resultados mostraram que as argamassas com RCMG mantiveram a trabalhabilidade dentro da faixa normativa, embora com maior demanda de água. No estado endurecido, o traço T-30F apresentou a melhor característica global, superando a argamassa de referência em resistência à compressão, tração na flexão e aderência. A análise econômica indicou redução de 7,85% no custo por metro cúbico, evidenciando ganhos técnicos, ambientais e financeiros. Conclui-se que o RCMG é uma alternativa sustentável e viável para argamassas de revestimento, contribuindo para a preservação de recursos naturais e redução de impactos ambientais.

Palavras-chave: RCMG; Resíduo; Sustentabilidade.

ABSTRACT

Currently, large amounts of solid waste are discarded into the environment, causing significant impacts. One of these wastes is marble and granite cutting waste (MGW). Therefore, this study evaluated the technical and economic feasibility of using marble and granite cutting waste as a partial substitute for aggregate and binder in rendering mortars. The research was motivated by the need to reduce the consumption of non-renewable resources, such as sand and cement, and to provide an appropriate destination for the waste generated by the ornamental stone industry. For this purpose, experimental mixes were produced with partial replacements of sand at 10%, 20% and 30%, and of cement at 10% by fine waste, and tested in both fresh and hardened states. The results showed that mortars with MGW maintained workability within the normative range, although with a higher water demand. In the hardened state, Mix T-30F presented the best overall performance, surpassing the reference mortar in compressive strength, flexural tensile strength, and bond strength. The economic analysis indicated a 7.85% reduction in cost per cubic meter, demonstrating technical, environmental, and financial benefits. It is concluded that MGW is a sustainable and viable alternative for rendering mortars, contributing to the preservation of natural resources and the reduction of environmental impacts.

Keywords: MGW; Waste; Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Chapa de Quartzito	16
Figura 2: Tanque de Decantação do resíduo	17
Figura 3: Resíduo de corte	18
Figura 4: Moinho de martelo.....	26
Figura 5: Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo	26
Figura 6: Ensaio de RCMG	27
Figura 7: CILAS 1090.....	28
Figura 8: Ensaio do DRX.....	29
Figura 9: Produção das argamassas	30
Figura 10: Moldagem dos corpos de provas prismáticos	30
Figura 11: Cura úmida.....	31
Figura 12: Ensaio da resistência à tração na flexão	32
Figura 13: Ensaio de resistência à compressão	33
Figura 14: Corpos de provas após 24h na estufa	34
Figura 15: Corpos de provas submersos por 24h.....	34
Figura 16: Equipamento utilizado no ensaio	35
Figura 17: Argamassa aplicada sob placa de concreto	35
Figura 18: Formas de ruptura no ensaio para um sistema de revestimento com chapisco ..	36
Figura 19: Curva Granulométrica	40
Figura 20: Granulometria a laser do material fino.....	42
Figura 21: Difração de Raios X	43
Figura 22: Curva granulométrica da areia	45
Figura 23: Ensaio de espalhamento (Flow Test)	46
Figura 24: Ensaio de espalhamento (Flow Test)	46
Figura 25: Corpos de provas rompidos a flexão	49
Figura 26: Resultado da superfície após ensaio.....	53
Figura 27: Corpo de prova classificado como tipo B.....	55
Figura 28: Corpo de prova classificado como tipo C	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição típica dos resíduos de quartzito, granito e mármore	18
Tabela 2: Resistência à compressão	20
Tabela 3: Resistência à tração na flexão	20
Tabela 4: Resistência potencial de aderência à tração	20
Tabela 5: Propriedades físicas.....	24
Tabela 6: Ensaios de classificação do agregado miúdo	27
Tabela 7: Traços estabelecidos	31
Tabela 8: Composição SINAPI 87292.....	38
Tabela 9: Análise granulométrica do resíduo	40
Tabela 10: Ensaios do agregado miúdo.....	44
Tabela 11: Resultado da resistência à compressão (MPA).....	47
Tabela 12: Gráfico da resistência à compressão	48
Tabela 13: Comparativo com Apolinário, 2014.....	48
Tabela 14: Média e desvio padrão da tração sob flexão	50
Tabela 15: Resistência à tração sob flexão.....	50
Tabela 16: Comparativo com Apolinário, 2014.....	51
Tabela 17: Média da Absorção	52
Tabela 18: Densidade.....	53
Tabela 19: Resultado ensaio de arrancamento.....	54
Tabela 20: Composição Sinapi ajustada para melhor traço	56
Tabela 21: Redução de Custo	56

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	VIII
LISTA DE TABELAS	IX
SUMÁRIO	X
1. INTRODUÇÃO	12
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Objetivo geral	13
1.2.2 Objetivos específicos	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 Estado da Arte	14
2.2 Rochas Ornamentais	15
2.3 Resíduo de Corte de Mármore e Granitos	16
2.4 Cimento Portland	19
2.5 Argamassa	19
2.6 Areia para uso em argamassas	21
2.7 Filler Calcário	21
3. METODOLOGIA	23
3.1 Classificação da Pesquisa	23
3.2 População e Amostra	23
3.3 Seleção e Caracterização dos Materiais	24
3.3.1 Água	24
3.3.2 Cimento Portland	24
3.3.3 Agregado Miúdo	24
3.3.4 Resíduo de corte de mármore e granitos (RCMG)	25
3.4 Ensaio do agregado miúdo e do RCMG	26
3.5 Ensaio dos finos do RCMG	27
3.5.1 Granulometria a laser	27
3.5.2 Difração de Raios X	28

3.6 Produção das argamassas -----	29
3.7 Ensaios do estado endurecido da argamassa -----	31
3.7.1 Resistência à tração na flexão e à compressão -----	31
3.7.2 Resistência à compressão -----	32
3.7.3 Absorção de água -----	33
3.7.4 Ensaio de Arrancamento -----	34
3.8 Análise Econômica -----	37
4. RESULTADOS -----	39
4.1 Caracterização dos Materiais -----	39
4.1.1 Resíduo de corte de mármore e granitos (Agregado miúdo) -----	39
4.1.2 Resíduo de corte de mármore e granitos (Finos) e areia -----	41
4.1.3 Agregado miúdo - Areia -----	43
4.2 Propriedades no Estado Fresco -----	45
4.2.1 Espalhamento (Flow Table) -----	45
4.3 Propriedades no Estado Endurecido -----	46
4.3.1 Resistência à compressão -----	46
4.3.2 Resistência à tração na flexão e à compressão -----	49
4.3.3 Absorção de água -----	51
4.3.4 Densidade -----	52
4.3.5 Ensaio de arrancamento -----	53
4.4 Resultado econômico -----	55
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS -----	56
6. REFERÊNCIAS -----	58

1. INTRODUÇÃO

A construção civil, no comparativo da escala global, se demonstra a maior consumidora de recursos naturais, tanto renováveis quanto não renováveis, usufruindo de 35 a 40% das matérias primas, bem como 40% da produção total de energia, e um aproximado de 15% da água mundial. Além disso, é responsável por 35% da emissão de monóxido de carbono do mundo. Os principais recursos primários amplamente utilizados são: areia e brita, como agregados miúdos e graúdo, respectivamente. Devido à alta demanda desses materiais, o consumo estimado é de 3,2 bilhões a 5,0 bilhões de toneladas de areia anualmente. (SILVA *et al.*, 2023)

No campo de grandes jazidas minerais, como rochas ornamentais, o Brasil se destaca. Essas, são transformadas em produtos que podem substituir revestimentos, pisos cerâmicos e fabricação de bancadas por meio do corte de grandes blocos. O consumo da indústria das rochas ornamentais tem demonstrado crescimento, no mercado nacional e internacional, ligado às etapas de produção deste material. Tendo 41% dessas rochas naturais transformadas em rejeitos durante sua produção. Considerando o impacto substancial da indústria da construção no meio ambiente, faz-se necessário a gestão sustentável dos recursos naturais nesse setor para um futuro mais consciente do ponto de vista ambiental. (MOREIRA *et al.*, 2022)

Portanto, faz-se necessário a reciclagem e a reutilização desses resíduos para o cumprimento das leis ambientais compatíveis com o desenvolvimento sustentável. Além disso, o pó de pedra e a brita das Rochas de Corte de Mármore e Granitos (RCMG) podem ser utilizados em diversas áreas da indústria devido à sua alta porcentagem de óxidos metálicos e partículas finas, sendo uma alternativa adequada para a substituição de muitos materiais com composições semelhantes. O compósito mais resiliente para a absorção de materiais residuais em sua composição é o concreto. Pesquisadores investigaram a integração de diferentes resíduos de pedras ornamentais no concreto como uma substituição para agregados, investigaram também o potencial de substituir agregados graúdos em concreto por 100% em peso de RCMG. (AL-JRAJREH *et al.*, 2023).

Diante desse contexto, o presente trabalho busca contribuir para a valorização do resíduo de corte de mármore e granito como insumo alternativo em argamassa de revestimento, avaliando suas propriedades no estado fresco e endurecido, bem como

sua viabilidade financeira. Assim, pretende-se oferecer uma alternativa sustentável que reduza o consumo de recursos naturais, mitigue impactos ambientais e gere benefícios econômicos para o setor da construção civil.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a viabilidade da utilização de resíduos de cortes de mármore e granitos (RCMG) como substituição parcial da areia e o cimento na fabricação de argamassas de revestimento.

1.2.2 Objetivos específicos

- Verificar as propriedades físico-mecânicas em substituição parcial da areia na argamassa.
- Verificar as propriedades físicos-mecânicas em substituição parcial de cimento para a argamassa.
- Analisar as propriedades das argamassas no estado fresco, considerando parâmetros como consistência e espalhamento.
- Avaliar a influência da substituição parcial da areia por diferentes teores de RCMG (10%, 20% e 30%).
- Verificar o efeito da substituição parcial do cimento por RCMG fino, atuando como filler, sobre as propriedades da argamassa.
- Quantificar o potencial de redução de custos obtido com a substituição parcial de cimento e areia pelo resíduo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Estado da Arte

O uso de resíduos de rochas ornamentais, especialmente o resíduo de corte de mármore e granito (RCMG), tem ganhado atenção como alternativa sustentável para a construção civil. Estudos recentes exploram sua aplicação em argamassas e concretos, com implicações técnicas e ambientais relevantes.

Em um trabalho de Moura, Gonçalves e Leite (2022), o RCMG foi incorporado como agregado miúdo em argamassas de revestimento e lajotas de piso. Observou-se que, em teores de até 10%, o material é tecnicamente viável, sem apresentar riscos ambientais e mantendo a resistência à compressão.

Alamada *et al.* (2022) investigaram o resíduo como adição mineral, substituindo 20% do cimento e avaliando diversas propriedades (resistência, elasticidade, absorção, carbonatação). Concluíram que o resíduo atuou eficazmente como filler, com aprimoramento da estrutura porosa e manutenção da resistência mecânica, especialmente em argamassas com menores relações água/cimento. Entretanto, não compensou totalmente a redução de cimento quanto à resistência a carbonatação.

No trabalho de Apolinário (2014), o RCMG foi testado em teores de 5%, 10% e 15% em argamassas de diversos tipos (Portland simples, mistas e industrializadas). Uma gama abrangente de propriedades foi avaliada (frescor, reologia, resistência absorção e durabilidade), identificando-se os melhores resultados com 10% nas argamassas simples e mistas, e 5% nas industrializadas.

Em escala internacional, uma pesquisa de 2024 sobre resíduos de mármore em Omã demonstrou que substituições de areia entre 60% e 70% por resíduos de mármore resultaram em argamassas com desempenho mecânico superior à mistura convencional.

Em contrapartida, estudo publicado pela MDPI sobre a substituição parcial do cimento por pó de granito revelou que 10% é ideal para preservar resistências; teores maiores que reduzem a resistência à flexão e compressão, enquanto aumentam a absorção de água.

Embora os resultados sejam promissores, Maciel *et al.* (2023), em revisão bibliométrica, destacam lacunas significativas na literatura: ainda faltam estudos

aprofundados sobre as propriedades reológicas, comportamento térmico, microestrutura e durabilidade em ambientes agressivos.

Lacuna científica do presente trabalho: sua pesquisa se insere nesse contexto, ao buscar aprofundar o entendimento sobre a aplicação do RCMG em argamassas de revestimento, analisando tanto as propriedades físico-mecânicas quanto microestruturais e ambientais, contribuindo para preencher as lacunas identificadas.

2.2 Rochas Ornamentais

O emprego da rocha pelo ser humano remonta à pré-história, período em que era utilizada na fabricação de instrumentos domésticos, armamentos para caça e guerra, além de itens de cunho religioso. Posteriormente, por volta de 8.000 a.C., seu uso foi expandido para a construção de moradias e estruturas defensivas, acompanhando o surgimento das cidades, centros de organização política e social (ALENCAR, 2013).

Na antiguidade, o uso de rochas ornamentais era bastante limitado, principalmente devido à restrição das jazidas e em razão das técnicas rudimentares disponíveis. No Egito Antigo, essas jazidas pertenciam aos faraós; na Grécia clássica, estavam sob domínio das cidades-estados; em Roma, eram controladas pelo governo; e, no Império Bizantino, integravam o patrimônio do imperador. Ademais, cada proprietário dispunha de especialistas encarregados da extração e do processamento inicial das rochas, tarefas que eram executadas por grandes grupos de trabalhadores escravizados, com ferramentas e métodos pouco sofisticados (ALENCAR, 2013).

Diante da historiografia da utilização de tais materiais, define-se, portanto, no contexto atual, conforme estabelecido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na norma 15012 (2013), rocha ornamental é um material rochoso natural que passa por diferentes etapas de beneficiamento para fins estéticos. Quando destinada ao revestimento, a rocha natural é processada para ser aplicada em acabamentos de superfícies, como fachadas, pisos e paredes na construção civil. Esse tipo de revestimento é caracterizado pela seleção, beneficiamento e acabamento da rocha em formatos e dimensões específicas, garantindo que atenda aos critérios estruturais e arquitetônicos exigidos.

Os blocos, chapas de rochas ornamentais e de revestimento englobam diferentes tipos de rochas que podem ser cortadas em diversos formatos e

beneficiadas por processos como esquadrejamento e polimento. Esses materiais podem ser de origem natural como granito, mármore e quartzito, e podem ser de origem artificial como os quartzos e ultracompactos. Suas aplicações incluem esculturas, móveis como tampos, bases de mesa, bancadas, revestimentos internos e externos. As transformações de bloco rochoso até as chapas chegam no produto ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Chapa de Quartzito



Fonte: Autoria própria (2025)

2.3 Resíduo de Corte de Mármore e Granitos

O avanço contínuo do setor da construção civil, embora essencial para o desenvolvimento, traz consigo impactos significativos ao meio ambiente, ameaçando a sustentabilidade ambiental. Esse cenário é agravado pelo consumo excessivo de recursos naturais não renováveis, como rochas, areia e argila, além da geração de uma enorme quantidade de resíduos devido ao elevado desperdício de materiais durante os processos construtivos. Esses resíduos, que chegam a milhões de toneladas anualmente, representam um desafio ambiental considerável, exigindo soluções urgentes para minimizar seus efeitos negativos.

O processamento de rochas ornamentais envolve a transformação de blocos brutos, extraídos diretamente das pedreiras, em materiais utilizáveis. Esse processo é dividido em duas etapas principais: o beneficiamento primário e o secundário. Na primeira etapa, realizada em grandes fábricas serrarias, os blocos são cortados com

máquinas de serras ou com fios de diamante em chapas de diferentes espessuras. Já na segunda etapa, que ocorre nas indústrias especializadas, as chapas passam por cortes mais precisos e recebem acabamentos específicos, conforme as demandas do mercado. A utilização de rochas ornamentais na construção civil exige que os blocos brutos sejam transformados em chapas. Durante esse processo, gera-se uma lama como resíduo, que é comumente armazenada em tanques. (MORAES, 2006). Além do pó fino, é gerado também resíduos dos cortes das chapas numa granulometria maior, sendo assim dois tipos de materiais distintos em forma, para um possível futuro reaproveitamento.

O resíduo poroso oriundo do corte é drenado para um tanque de decantação onde essa água será reaproveitada para realizar os cortes do maquinário (Figura 2). O resíduo de corte fica armazenados embaixo da máquina onde é efetuado o corte (Figura 3). Quando esses tanques estão cheio de material, são retirados e descartados para empresas de recolhimento de entulhos, não possuindo um viés de reutilização.

Figura 2: Tanque de Decantação do resíduo



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 3: Resíduo de corte



Fonte: Autoria própria (2025)

Desse modo, segundo Ahmed, *et al* (2023) e Nyako, *et al.* (2023) a composição mineralógica (Tabela 1) desses materiais preservam em grande parte, a mineralogia e a composição química da rocha de origem. De forma geral: resíduos de quartzito são muito ricos em sílica (quartzosos), resíduos de granito são predominantemente silicatos com teores relevantes de alumina e álcalis (devido aos feldspatos e micas), e resíduos de mármore são essencialmente carbonáticos (calcita/dolomita), reportando altos teores equivalentes de CaO e perda ao fogo (LOI) associada à decomposição de carbonatos.

Tabela 1: Composição típica dos resíduos de quartzito, granito e mármore

Resíduo	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	LOI*
Quartzito	90 - 99	≤ 3	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	0 - 2
Granito	60 - 75	10 - 16	1 - 4	1 - 4	0.5 - 2	3 - 6	2 - 4	0 - 2
Mármore	2 - 10	≤ 2	≤ 2	45 - 55	1 - 6	≤ 1	≤ 1	25 - 35

Fonte: Ahmed, *et al* (2023) e Nyako, *et al.* (2023)

2.4 Cimento Portland

Há milhares de anos, as civilizações antigas já demonstravam domínio no uso de materiais aglomerantes. No Egito, por exemplo, monumentos grandiosos eram erguidos com uma mistura à base de gesso calcinado, conforme registros históricos. Da mesma forma, os gregos e romanos utilizavam solos vulcânicos, como os provenientes da ilha de Santorini e da região de Pozzuoli, na Itália, que endureciam em contato com a água, permitindo a construção de obras icônicas, como o Panteão e o Coliseu. O termo "cimento", por sua vez, tem origem no latim "CAEMENTU", que se referia a pedras naturais irregulares extraídas de rochedos. (MO, 2021)

Atualmente, o cimento Portland é o aglomerante mais utilizado globalmente na construção civil. Trata-se de um pó extremamente fino, com partículas em torno de 50 µm, obtido a partir da combinação de clínquer com outros componentes, como gesso, pozolanas, escórias ou materiais carbonáticos, dependendo das propriedades desejadas e da aplicação específica. Quando misturado com água e agregados, como areia, brita, pó de pedra ou cal, o cimento Portland dá origem a concretos e argamassas, essenciais para a construção de residências, edifícios, pontes, barragens, estradas e diversas outras estruturas. (MOURA, 2021)

2.5 Argamassa

A argamassa é um insumo utilizado na construção civil, resultante da combinação homogênea de aglomerantes, como cimento ou cal, com agregado miúdo, geralmente areia, e água. Para aprimorar suas propriedades ou conferir características específicas ao material, podem ser incorporados aditivos ou componentes adicionais.

O desempenho da argamassa, segundo a NBR 13281 de 2005, está diretamente ligado às suas propriedades tanto no estado plástico quanto no estado endurecido. Quando ainda plástica, é fundamental que apresente boa trabalhabilidade, facilitando a aplicação e o assentamento dos blocos, além de possuir uma retenção hídrica adequada para assegurar a hidratação eficiente do cimento. Após o endurecimento, espera-se que possua resistência satisfatória à compressão, além de garantir aderência eficaz e resistência ao cisalhamento. Dessa forma, as tabelas 2, 3 e 4 vão trazer as classes da argamassa de acordo com seu desempenho.

Tabela 2: Resistência à compressão

Classe	Resistência à compressão (Mpa)	Método de ensaio
P1	$\leq 2,0$	ABNT NBR 13279
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	$>8,0$	

Fonte: NBR 13281 (2005)

Tabela 3: Resistência à tração na flexão

Classe	Resistência à tração na flexão (Mpa)	Método de ensaio
R1	$\leq 1,5$	ABNT NBR 13279
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,5 a 4,5	
R6	$>3,5$	

Fonte: NBR 13281 (2005)

Tabela 4: Resistência potencial de aderência à tração

Classe	Resistência potencial de aderência à tração (Mpa)	Método de ensaio
A1	$<0,20$	ABNT NBR 13279
A2	$\geq 0,20$	
A3	$\geq 0,30$	

Fonte: NBR 13281 (2005)

2.6 Areia para uso em argamassas

A areia é um dos principais componentes na produção de argamassas, atuando como agregado miúdo que confere estrutura e resistência ao material. Sua principal função é preencher vazios entre as partículas de cimento, garantido uma distribuição uniforme e contribuindo para a trabalhabilidade da mistura. A qualidade da areia utilizada é crucial, pois características como granulometria, formato das partículas e presença de impurezas podem influenciar diretamente no desempenho da argamassa.

O crescimento acelerado do setor da construção civil, impulsionado pelo uso intensivo de concreto em diversas obras, tem elevado significativamente a procura por areia natural. Essa demanda crescente tem levado à extração descontrolada de areia dos leitos dos rios, gerando impactos ambientais preocupantes, como a degradação de ecossistemas aquáticos e o esgotamento desses recursos naturais. Estima-se que, anualmente, o consumo global de areia de rio, utilizada principalmente na produção de concreto, vidro e componentes eletrônicos, varie entre 32 e 50 bilhões de toneladas. Desse total, cerca de 80% são destinados à fabricação de concreto, o que pode resultar em uma escassez futura de agregados. Projeções indicam que, até 2060, a necessidade global por areia pode aumentar em até 45%, intensificando ainda mais os desafios ambientais e a pressão sobre os recursos naturais disponíveis. (SILVA *et al.* 2023).

Diante desse cenário, a busca por substitutos para a areia natural tornou-se uma necessidade urgente. Entre as opções viáveis, o pó de pedra surge como uma alternativa economicamente atrativa e ecologicamente sustentável, podendo ser utilizado como agregado fino na fabricação de concreto convencional. Essa substituição não apenas reduz a dependência de recursos naturais escassos, mas também contribui para minimizar os impactos ambientais associados à extração excessiva de areia. (SILVA *et al.* 2023).

2.7 Filler Calcário

O filler calcário é classificado como um material cimentício suplementar (MCS) amplamente presente na formulação de cimentos utilizados no Brasil e no exterior embora sua aplicação ainda seja restrita. Esse material possui ampla disponibilidade, baixo custo de produção e reduzido impacto ambiental, uma vez que

seu processo produtivo se resume à extração e moagem da matéria-prima, emitindo entre 26 e 75 kg de CO₂ por tonelada (HABERT *et al.*, 2013) — um número significativamente inferior à produção de clínquer, que gera cerca de 821 kg de CO₂ por tonelada segundo o Sindicato Nacional da Indústria do cimento,

Apesar de apresentar baixa reatividade, sendo considerado praticamente inerte, o filler calcário pode influenciar de forma relevante o desempenho do cimento. Ele pode atuar como diluente ou otimizar o empacotamento das partículas secas o que contribui para reduzir a quantidade de água necessária para atingir determinada consistência (LANGE; MÖRTEL; RUDERT, 1997). No entanto, é importante ressaltar que o aumento da porosidade, relacionada à presença de água não combinada quimicamente, pode comprometer a resistência mecânica do compósito cimentício (POWERS, 1958). Isso significa que, mesmo com a mesma relação água/materiais finos, a elevação do teor de filler pode levar à queda da resistência por aumento da porosidade. Por outro lado, quando a adição de filler permite reduzir a quantidade de água, mantendo constante a relação água/ligante, pode haver melhora nas propriedades mecânicas. (RAMEZANIANPOUR *et al.*)

Além de influenciar a demanda de água, o filler pode atuar como agente de nucleação devido à sua granulometria fina, acelerando a hidratação do cimento e favorecendo o ganho de resistência nas primeiras idades. Estudos indicam ainda que, mesmo em idades mais avançadas, a presença de filler pode alterar a resistência mecânica — em alguns casos positivamente, desde que a relação água/ligante seja controlada (REZVANI; PROSKE, 2017). Quando essa relação não é mantida constante, pode haver prejuízos não só à resistência à compressão como também ao módulo de elasticidade, devido ao aumento da porosidade (BENTZ *et al.*, 2009; BENACHOUR *et al.*, 2008). Em composições onde essa relação é fixada, no entanto, observou-se melhora nas propriedades mecânicas com o incremento do teor de filler calcário.

3. METODOLOGIA

3.1 Classificação da Pesquisa

O estudo é do tipo experimental, conforme classificação de Gil (2002), pois envolve a manipulação intencional de uma variável independente (a adição de RCMG em argamassas) para analisar seus efeitos em variáveis dependentes (propriedade físico-mecânicas).

A Metodologia dessa pesquisa foi distribuída em: caracterização dos materiais utilizados, dosagem e produção de argamassas no estado endurecido. Para os ensaios foram moldados 12 corpos de prova (CP's) para cada traço e mistura, e para rompimento a 7 e 28 dias, totalizando 96 CP's.

3.2 População e Amostra

O estudo adotará um plano experimental com uma única variável independente (proporção de resíduos de granito) para o grupo experimental 1 e para o grupo experimental 2 são duas variáveis independentes (percentual de substituição da areia e do cimento), dividido em grupos com diferentes tratamentos:

- Grupo Controle (Traço referência): Argamassa sem resíduos de granito (0%).
- Grupos Experimentais 1 (T-10, T-20, T-30): Argamassas com proporções variadas de resíduos 10%, 20% e 30% da substituição da areia.
- Grupos Experimentais 2 (T-10F, T-20F, T-30F): Argamassas com proporções variadas de resíduos 10%, 20% e 30% da substituição da areia e com substituição de 10% do cimento pelo material fino.

Cada grupo será submetido a ensaios padronizados resistência à compressão, absorção de água para comparar os resultados.

Variáveis:

- Independente: Proporção de resíduo de granito (quantitativa).
- Dependentes: Resistência mecânica, porosidade, módulo de elasticidade etc.
- Controle: Tipo de cimento, relação água/cimento, tempo de cura, condições ambientais.

3.3 Seleção e Caracterização dos Materiais

A caracterização dos materiais do estudo foi feita por ensaios físicos, os quais atenderam às especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

3.3.1 Água

A água utilizada no experimento foi a água potável distribuída pela rede pública da cidade de João Pessoa, Paraíba.

3.3.2 Cimento Portland

O cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) foi o escolhido para a utilização neste estudo experimental, pois aos 7 dias de cura este possui um alto comportamento mecânico (MOURA, 2021).

Ressalta-se que a utilização do cimento Portland CPV-ARI se deu por questões de disponibilidade no laboratório, uma vez que a empresa Cimento Nacional realizou doação do material à Universidade Federal da Paraíba. Embora o foco da pesquisa esteja associado à busca por soluções sustentáveis e à redução do consumo de aglomerantes, optou-se pela aplicação deste tipo de cimento devido à sua acessibilidade e às condições práticas de execução dos ensaios laboratoriais.

As propriedades do cimento utilizado (Tabela 5), Cimento Portland da marca Nacional, foram obtidas da ficha técnica disponibilizada pelo fabricante, contendo as seguintes informações:

Tabela 5: Propriedades físicas

Ensaio	Resultado
Massa específica g/cm ³	3,02
Densidade g/cm ³	2,99

Fonte: Cimento Nacional (2025)

3.3.3 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado neste estudo corresponde à areia natural lavada, de granulometria fina, proveniente do município de João Pessoa – PB. Para a

caracterização física desse material, foram realizados ensaios conforme normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a fim de verificar sua adequação para uso em argamassas.

Os ensaios contemplaram:

- Análise granulométrica (NBR 17054:2022), realizada por peneiramento, para determinar a distribuição do tamanho das partículas e comparar com os limites estabelecidos pela norma.
- Massa específica (NBR 6458:2016), determinada pelo frasco de Le Chatelier, visando obter a densidade real dos grãos.
- Massa unitária (NBR 16972:2021), obtida por meio de ensaio em recipiente padronizado, para avaliar a densidade aparente do agregado solto.
- Absorção de água (NBR 16916:2021), a fim de identificar a porosidade e a capacidade de retenção hídrica da areia.

A caracterização do agregado miúdo foi fundamental para definir os traços experimentais e possibilitar a comparação direta com o resíduo de corte de mármore e granito (RCMG), que também passou pelos mesmos procedimentos de ensaio.

3.3.4 Resíduo de corte de mármore e granitos (RCMG)

O RCMG foi retirado de uma empresa que realiza o beneficiamento de mármore e granitos na cidade de Cabedelo – PB. O agregado miúdo foi coletado de tanques (Figura 2) e o agregado graúdo de um tanque abaixo da máquina de corte (Figura 3) e esses materiais foram levados em baldes até o laboratório LABEME na UFPB Campus 1. O Material miúdo foi posto em uma estufa por 24h e o graúdo foi levado para o moinho de martelo (Figura 4) para transformá-lo na granulometria adequada para da areia da argamassa, conforme os limites impostos pela norma (Figura 5).

Figura 4: Moinho de martelo



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 5: Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100
NOTAS 1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90. 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20. 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.				

Fonte: NBR 7211 (2005)

3.4 Ensaios do agregado miúdo e do RCMG

Baseado no procedimento técnico das Normas Brasileiras, foram realizados estudos de massa unitária, massa específica, absorção e granulometria para obter o melhor traço, mostrados na Figura 6. Na Tabela 6 apresenta-se as algumas informações teóricas dos ensaios.

Tabela 6: Ensaios de classificação do agregado miúdo

Ensaio	Objetivo	Método	Norma ABNT
Análise Granulométrica	Determinar a distribuição dos tamanhos das partículas	Peneiramento (partículas $\geq 0,075$ mm)	NBR 17054 (2022)
Massa Específica (Real)	Determinar a densidade dos grãos, sem incluir vazios	Frasco de Le Chatelier (agregados)	NBR 6458 (2006)
Absorção de Água	Determinar a quantidade de água absorvida pelo material	Ensaio por imersão (massa seca e saturada)	NBR 16916 (2021)
Massa Unitária	Determinar a massa por volume com ou sem compactação	Ensaio em recipiente de volume conhecido	NBR 16972 (2021)

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 6: Ensaio de RCMG



Legenda: A) Resultado da granulometria; B) Ensaio de sedimentação; C) Ensaio de absorção de água

Fonte: Autoria própria (2025)

3.5 Ensaios dos finos do RCMG

3.5.1 Granulometria a laser

A análise por difração a laser é realizada por meio de um dispositivo conhecido como granulometria a laser. Esse instrumento é utilizado nas investigações científicas, permitindo uma avaliação mais ágil do tamanho das partículas presentes no solo, especialmente se comparado aos métodos tradicionais de sedimentação que exigem mais tempo para fornecer dados semelhantes. Sua operação rápida e descomplicada contribui para sua ampla adoção em estudos laboratoriais (MANSO, 1999). A análise

foi realizada pelo equipamento similar mostrado na Figura 7.

Figura 7: CILAS 1090



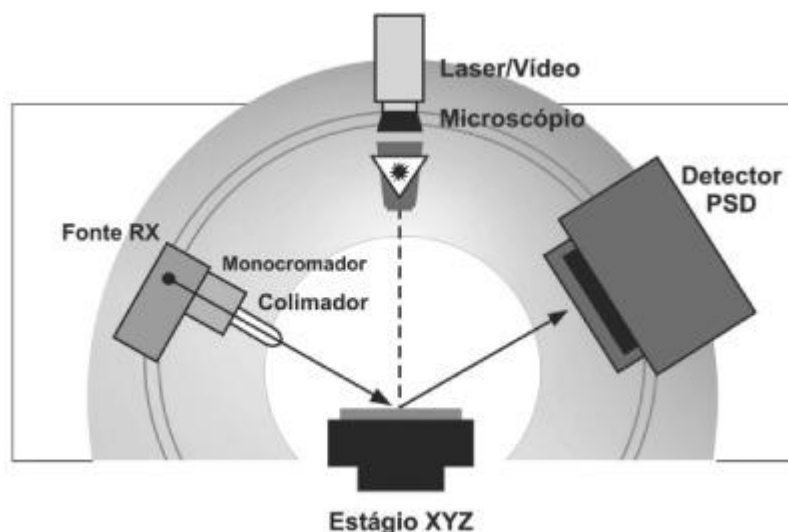
Fonte: Plataforma Nacional de Infraestrutura de Pesquisa (2025)

3.5.2 Difração de Raios X

De acordo com Callister (2016) os raios X pertencem ao espectro eletromagnético e se destacam por possuírem elevada energia e comprimentos de onda bastante reduzidos — comparáveis às distâncias entre átomos em estruturas cristalinas. Ao atingirem um sólido, parte desses raios é espalhada em diferentes direções, resultado da interação com os elétrons ligados aos átomos ou íons presentes no caminho do feixe (Figura 8). Para que ocorra a difração desse tipo de radiação, é fundamental que exista uma organização periódica dos átomos no material.

A técnica de difração de raios X é amplamente empregada para identificar a estrutura dos cristais e medir as distâncias entre planos atômicos. Quando um cristal é exposto a um feixe de raios X, essa radiação pode ser desviada de forma ordenada — por meio de interferência construtiva — ao interagir com conjuntos paralelos de planos formados pelos átomos da rede cristalina. (CALLISTER, 2016).

Figura 8: Ensaio do DRX



Fonte: CRATON (2025)

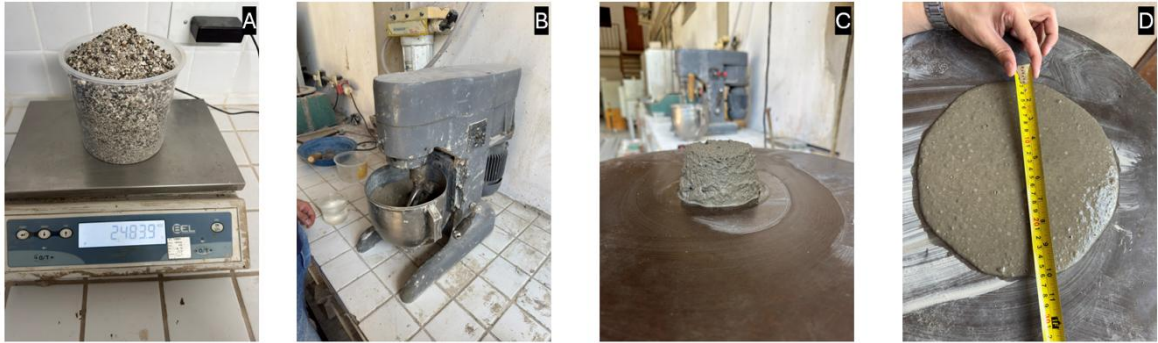
3.6 Produção das argamassas

A produção das argamassas foi realizada conforme os traços estabelecidos na Tabela 7, contemplando tanto o traço de referência (REF) quanto aqueles com diferentes teores de substituição do agregado miúdo natural e do cimento pelo resíduo de mármore e granito (RCMG).

Inicialmente, todos os materiais foram previamente secos em estufa e homogeneizados manualmente. A ordem da mistura seguiu o procedimento usual de laboratório: primeiro o cimento, os finos e os agregados, adicionando-se gradativamente a água de amassamento até atingir a consistência.

Para cada traço foi realizado o ensaio de abatimento da argamassa, a fim de avaliar a consistência e ajustar a relação água/cimento (a/c) até que fosse atingida a condição de trabalhabilidade adequada, fixada em um espalhamento médio de 260 ± 5 mm na mesa de consistência, conforme a NBR 13276 (2016). Dessa forma, foi necessário ajustar a a/c inicial para obter a consistência normatizada. Todo esse passo está conforme a Figura 9.

Figura 9: Produção das argamassas



Legenda: A) Pesagem de todos materiais; B) Mistura dos materiais na argamassadeira; C) CP para teste de abatimento; D) Teste de abatimento

Fonte: Autoria Própria (2025)

Após a determinação do abatimento, foram moldados os corpos de prova prismáticos (40 mm x 40 mm x 160 mm), em número de 12 para cada traço (Figura 10) totalizando 96 corpos de prova. A moldagem foi realizada conforme os procedimentos da NBR 13279 (2005), utilizando-se adensamento mecânico em duas camadas, com posterior acabamento superficial.

Figura 10: Moldagem dos corpos de provas prismáticos



Fonte: Autoria Própria (2025)

Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas e submetidos à cura úmida até as idades de ensaio (7 e 28 dias), garantindo condições controladas de temperatura e umidade para o adequado desenvolvimento das propriedades mecânicas das argamassas, conforme Figura 11.

Figura 11: Cura úmida



Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 7: Traços estabelecidos

Traço	CP's	Cimento	Finos	Areia Natural	Resíduo	A/C Inicial	A/C Ajustada
REF-1 (padrão)	12	1,00	-	4,50	0,00	0,60	0,80
T-10	12	1,00	-	4,05	0,45	0,60	0,80
T-20	12	1,00	-	3,60	0,90	0,62	0,80
T-30	12	1,00	-	3,15	1,35	0,64	0,80
REF-F (Finos)	12	0,90	0,10	4,70	0,00	0,60	0,80
T-10F	12	0,90	0,10	4,23	0,47	0,62	0,80
T-20F	12	0,90	0,10	3,76	0,94	0,64	0,80
T-30F	12	0,90	0,10	3,29	1,41	0,66	0,80

Fonte: Autoria Própria (2025)

3.7 Ensaios do estado endurecido da argamassa

3.7.1 Resistência à tração na flexão e à compressão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi conduzido de acordo com a ABNT NBR 13279:2005, que estabelece os procedimentos para avaliação da resistência mecânica de argamassas no estado endurecido.

Inicialmente, os corpos de prova prismáticos foram posicionados no

dispositivo de carga em três pontos de apoio e submetidos a carregamento uniforme até a ruptura. O valor da resistência à tração na flexão foi obtido a partir da carga máxima aplicada e da geometria do corpo de prova, sendo calculado individualmente para cada amostra e posteriormente determinada a média dos três resultados por idade de ensaio (7 e 28 dias).

É importante destacar que, conforme estabelece a norma, primeiro ocorre o rompimento do corpo de prova na flexão para determinação da resistência à tração. Em seguida, as duas metades resultantes desse ensaio são aproveitadas para a realização do ensaio de compressão axial, garantindo o aproveitamento integral do material e a padronização metodológica.

Esse procedimento assegura maior representatividade dos resultados, uma vez que a sequência de ruptura permite avaliar de forma complementar a resistência à tração e à compressão em amostras provenientes de uma mesma moldagem. A Figura 12 ilustra o ensaio de tração na flexão realizado em laboratório.

Figura 12: Ensaio da resistência à tração na flexão



Fonte: Autoria própria (2025)

3.7.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão axial foi obtida conforme a ABNT NBR 13279:2005, que estabelece o método de ensaio para argamassas de assentamento e revestimento. Os corpos de prova prismáticos, previamente curados por 7 e 28 dias, foram submetidos ao ensaio de compressão axial em máquina universal de ensaios.

O resultado da resistência à compressão foi calculado pela relação entre a

carga máxima aplicada e a área da seção transversal resistente do corpo de prova. Esse ensaio é essencial para avaliar a viabilidade técnica da substituição parcial da areia e do cimento por resíduos de mármore e granito (RCMG), uma vez que a resistência mecânica é um dos principais requisitos para o uso da argamassa em revestimentos. Figura 13 apresenta o procedimento experimental realizado.

Figura 13: Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autoria própria (2025)

3.7.3 Absorção de água

O ensaio de absorção de água foi conduzido segundo a ABNT NBR 9778:2009, que trata da determinação da absorção de água por imersão em argamassas e concretos. Inicialmente, os corpos de prova endurecidos foram secos em estufa a 105 ± 5 °C até atingirem massa constante (Figura 14). Em seguida, foram imersos em água (Figura 15) à temperatura ambiente por período controlado, sendo registradas as massas saturadas e seca.

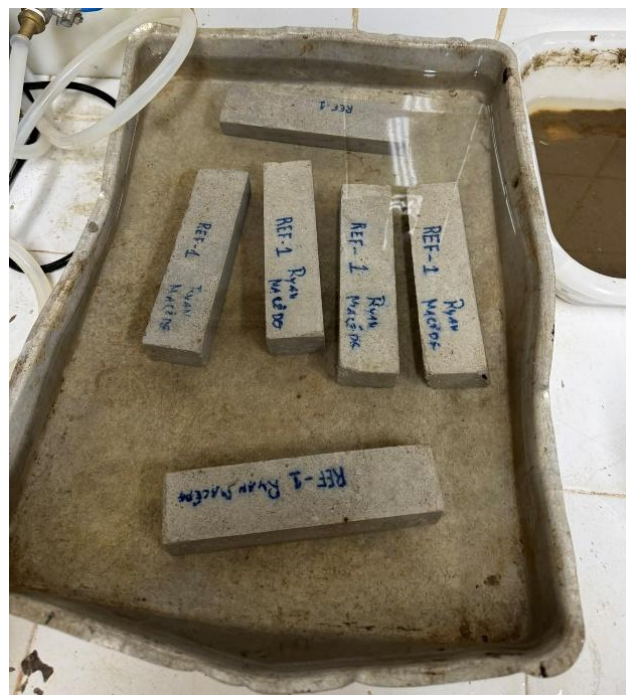
A absorção de água foi determinada pela diferença entre as massas saturada e seca, dividida pela massa seca do corpo de prova, expressa em percentual (%). Esse parâmetro é de grande relevância para argamassas de revestimento, pois está diretamente associado à porosidade do material e à sua durabilidade frente à ação de agentes externos, como umidade, ciclos de secagem e carbonatação.

Figura 14: Corpos de provas após 24h na estufa



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 15: Corpos de provas submersos por 24h



Fonte: Autoria própria (2025)

3.7.4 Ensaio de Arrancamento

O ensaio de aderência à tração, também conhecido como ensaio de arrancamento, foi conduzido conforme os procedimentos descritos na ABNT NBR 13528-1:2019, que estabelece a metodologia para determinação da resistência de aderência de argamassas aplicadas como revestimento.

Para a execução do ensaio, foi utilizado o dispositivo de arrancamento

(Figura 16) no painel de concreto com aplicação das argamassas em estudo, conforme Figura 17, respeitando-se as condições de preparo, tempo de cura e espessura da camada conforme prescrito na norma. A superfície de ensaio foi previamente regularizada com chapisco e mantida em condições ambientais controladas durante o período de cura.

Figura 16: Equipamento utilizado no ensaio



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 17: Argamassa aplicada sob placa de concreto



Fonte: Autoria própria (2025)

Após a cura mínima de 28 dias, foram colados, sobre a superfície da argamassa, discos metálicos de 50 mm de diâmetro, utilizando-se adesivo epóxi estrutural de alta resistência. O conjunto foi mantido em repouso pelo tempo necessário à completa cura do adesivo.

Em seguida, foi realizado o ensaio de tração utilizando equipamento apropriado de arrancamento, que aplica carga perpendicular à superfície do revestimento, promovendo a ruptura do sistema argamassa-substrato. Durante o ensaio, registrou-se a carga máxima aplicada (F) no momento da ruptura. A resistência de aderência foi calculada pela expressão:

$$Ra = \frac{F}{A} \quad eq. 1$$

Ra = resistência de aderência (MPa);

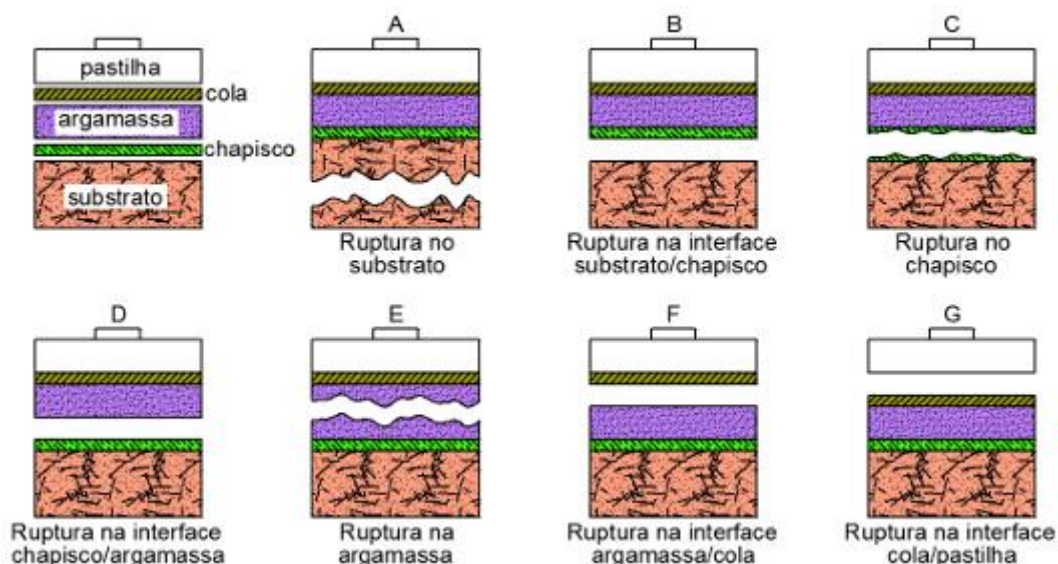
F = carga máxima no momento da ruptura (N);

A = área do disco metálico colado (mm²).

De acordo com os requisitos de desempenho estabelecidos na NBR 13528-1:2019, a resistência de aderência mínima deve variar conforme a classe de aplicação da argamassa (assentamento, revestimento interno ou externo, ambientes úmidos, entre outros).

Os diferentes casos de ruptura para um sistema de revestimento com chapisco estão relacionados e exemplificados pela Figura 18.

Figura 18: Formas de ruptura no ensaio para um sistema de revestimento com chapisco



Fonte: NBR 13528:2010 com adaptações de APOLINÁRIO E.C.A, 2014

a) Ruptura no substrato: Demonstra que houve boa aderência entre a argamassa e o substrato, porém este apresentou menor resistência à tração;

b) Ruptura na interface substrato/chapisco: Caracteriza baixa aderência do chapisco ao substrato, a qual pode estar associada à presença de resíduos na superfície, à textura lisa do material de base ou ainda a uma cura inadequada do chapisco, RUDUIT (2009);

c) Ruptura no chapisco: Ocorre quando o chapisco apresenta cura deficiente ou quando o traço utilizado possui baixo teor de cimento, (RUDUIT 2009);

d) Ruptura na interface chapisco/argamassa: Relaciona-se à ausência de contato adequado entre o chapisco e a argamassa, ou à elevada impermeabilidade do chapisco (RUDUIT, 2009);

e) Ruptura na argamassa: Indica que a argamassa empregada não possui características compatíveis para o revestimento;

f) Ruptura na interface argamassa/cola: Revela que a argamassa apresenta baixa resistência superficial, o que pode comprometer o desempenho do revestimento, especialmente quando há camada decorativa;

g) Ruptura na interface cola/pastilha: Resulta na falha da colagem na pastilha e o resultado deve ser desprezado, NBR 13528-2:2019.

3.8 Análise Econômica

A análise financeira deste trabalho foi desenvolvida com base na comparação entre o custo da argamassa convencional e o custo da argamassa produzida com substituição parcial de cimento e areia por resíduos de corte de mármore e granito. Para essa etapa, adotou-se como referência as composições de serviços da Tabela SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil), que fornecem os consumos unitários de materiais e os preços médios regionais de insumos.

Inicialmente, foi selecionada uma composição do SINAPI (Tabela 8) referente à execução de argamassa de revestimento, a qual apresenta as quantidades de cimento e agregado miúdo (areia) necessárias para a produção de um metro cúbico de argamassa. Essas quantidades foram consideradas como traço de referência.

Tabela 8: Composição SINAPI 87292

Código	Nome	Custo unitário	Quantidade	Unidade	Custo Total
88831	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL DE 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV, SEM CARREGADOR - CHI DIURNO. AF_05/2023	0,38	3,45	CHI	1,31
88830	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL DE 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV, SEM CARREGADOR - CHP DIURNO. AF_05/2023	1,69	1,05	CHP	1,77
88377	OPERADOR DE BETONEIRA ESTACIONÁRIA/MISTURADOR COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	32,47	4,5	H	146,11
1379	CIMENTO PORTLAND COMPOSTO CP II-32	0,62	195,86	KG	121,43
1106	CAL HIDRATADA CH-I PARA ARGAMASSAS	0,93	174,1	KG	161,91
370	AREIA MEDIA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)	85	1,16	M3	98,6

Fonte: SINAPI (2025)

Em seguida, foram aplicadas as proporções determinadas nos ensaios experimentais do presente estudo, nas quais verificou-se melhor desempenho para a substituição de 10% do cimento e 30% da areia por resíduo de mármore e granito. A partir dessas reduções, foram recalculadas as quantidades de insumos para a obtenção da argamassa modificada.

Os preços dos insumos (cimento, areia e demais materiais) foram extraídos da base de dados SINAPI correspondente ao estado da Paraíba (06/2025). O custo do resíduo não foi um objeto de mensuração específica nesta pesquisa, considerando nulo apenas para efeito de análise comparativa. Ressalta-se que, em um cenário prático, podem existir custos adicionais relacionados ao transporte, beneficiamento e peneiramento do resíduo.

O cálculo do custo unitário foi realizado multiplicando-se a quantidade de cada insumo pelo seu preço unitário, tanto para a argamassa de referência quanto para a argamassa com substituição. A diferença entre os dois valores corresponde à economia unitária por metro cúbico de argamassa. A economia percentual foi obtida pela razão entre a economia unitária e o custo da argamassa convencional.

Por fim, projetou-se a economia total para o volume de argamassa estimado no projeto de estudo de caso, permitindo avaliar a viabilidade econômica da substituição em escala de obra.

4. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos na pesquisa. Isso foi dividido nas seguintes partes: caracterização dos materiais, propriedades no estado fresco e propriedades no estado endurecido.

4.1 Caracterização dos Materiais

4.1.1 Resíduo de corte de mármore e granitos (Agregado miúdo)

A caracterização física do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG), após britagem em moinho de martelo, está apresentada na Tabela 9. Os resultados indicam que o material possui diâmetro máximo de 4,75 mm e módulo de finura de 2,7, valores compatíveis com a faixa de agregados miúdos definida pela NBR 7211 (2009), situando-se na zona de granulometria média (Figura 19).

A massa específica do resíduo foi de 2,74 g/cm³, valor superior ao da areia natural (2,57 g/cm³ – ver seção 4.1.3), fato explicado pela maior concentração de minerais densos como quartzo e feldspatos, em concordância com Ahmed *et al.* (2023) e Nyako *et al.* (2023), que descrevem os resíduos de rochas ornamentais como ricos em silicatos e carbonatos.

A massa unitária obtida foi de 1,64 g/cm³, superior à da areia de referência (1,23 g/cm³), o que indica melhor empacotamento das partículas e menor presença de vazios no estado solto. Esse comportamento pode contribuir para maior densificação da matriz cimentícia, aspecto também relatado por Apolinário (2014).

Entretanto, um dos resultados mais relevantes foi a elevada absorção de água do resíduo (18,06%), significativamente superior à areia natural ($\approx$ 1,5% a 2,0%). Esse comportamento está associado à porosidade intrínseca do RCMG e tende a aumentar a demanda de água das argamassas, exigindo ajustes na relação água/cimento para manter a trabalhabilidade (SILVA *et al.*, 2023; Almada *et al.*, 2022).

De modo geral, a análise granulométrica mostra que o RCMG pode ser enquadrado como agregado miúdo adequado ao uso em argamassas, desde que se considere sua maior absorção de água, fator crítico para a dosagem. Esses achados

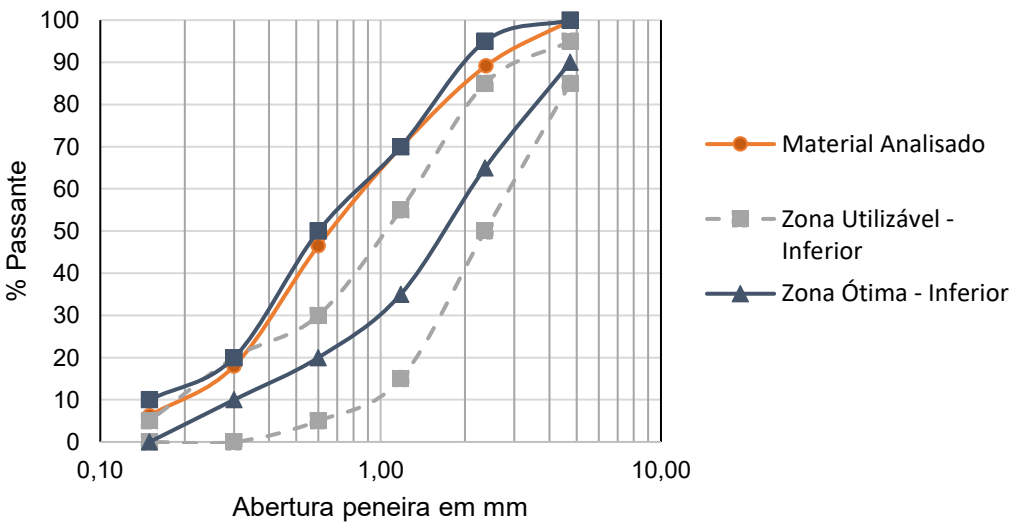
corroboram estudos prévios (Moura *et al.*, 2022; Moreira *et al.*, 2022), que também identificaram o potencial do resíduo como substituto parcial da areia, ressaltando a necessidade de controle reológico para garantir desempenho adequado.

Tabela 9: Análise granulométrica do resíduo

Tyler	Abertura (mm)	% Passante
4	4,75	99,895
8	2,36	89,191
16	1,18	69,873
28	0,6	46,533
48	0,3	17,972
100	0,15	6,252
Diâmetro Máximo (mm)		4,75
% Módulo de Finura		2,703
Massa Específica (g/cm³)		2,74
Massa unitária (g/cm³)		1,64
% Absorção		18,06

Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 19: Curva Granulométrica



Fonte: Autoria Própria (2025)

4.1.2 Resíduo de corte de mármore e granitos (Finos) e areia

4.1.2.1 Granulometria a laser

A análise granulométrica a laser do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) na fração fina encontra-se representada na Figura 20. Observa-se que o material apresenta predominância de partículas inferiores a 75 µm, o que caracteriza sua atuação como filler dentro da matriz cimentícia. Esse resultado está em consonância com a literatura, que aponta o resíduo como potencial substituto parcial do cimento devido à sua elevada finura (APOLINÁRIO, 2014; ALMADA *et al.*, 2022).

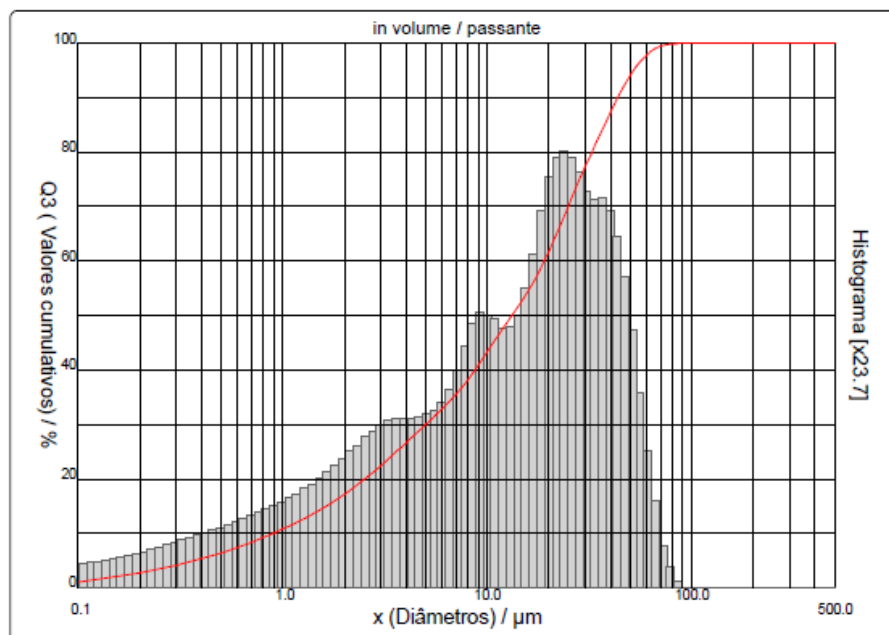
A elevada fração de partículas abaixo da peneira #200 (< 0,075 mm) favorece o efeito de empacotamento, reduzindo a porosidade e preenchendo os vazios entre os grãos do cimento e do agregado miúdo. Segundo Rezvani e Proske (2017), essa condição melhora a compactação da argamassa e pode contribuir para ganhos de resistência mecânica, sobretudo nas idades iniciais, atuando como sítio de nucleação para a hidratação do cimento.

Entretanto, o excesso de finos também pode resultar em aumento da demanda de água, uma vez que a maior área superficial das partículas exige mais líquido para atingir a mesma consistência da mistura (LANGE; MÖRTEL; RUDERT, 1997). Essa tendência foi confirmada durante a produção das argamassas experimentais, onde se verificou a necessidade de ajustes na relação água/cimento (ver seção 3.6).

Além disso, a presença de partículas ultrafinas reforça o caráter multifuncional do RCMG: ao mesmo tempo em que atua como agregado alternativo, pode desempenhar papel de adição mineral similar ao filler calcário. Essa característica se alinha às observações de Nyako *et al.* (2023), que destacam o potencial do resíduo em refinar a microestrutura da matriz e reduzir a conectividade dos poros, minimizando os efeitos negativos de sua alta absorção.

Portanto, a granulometria a laser confirma a viabilidade do RCMG como substituto parcial do cimento em argamassas de revestimento, desde que seu teor seja limitado para evitar excesso de finos que possa comprometer a trabalhabilidade e aumentar a porosidade.

Figura 20: Granulometria a laser do material fino



Fonte: Autoria própria (2025)

4.1.2.2 Análise mineralógica

A análise de difração de raios X (Figura 21) do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) evidenciou a predominância de quartzo (SiO_2) como fase cristalina principal, identificada pelo pico característico em $2\theta \approx 26,6^\circ$, em concordância com os estudos de Lopes (2019) que também apontaram o quartzo como mineral majoritário em resíduos de rochas ornamentais.

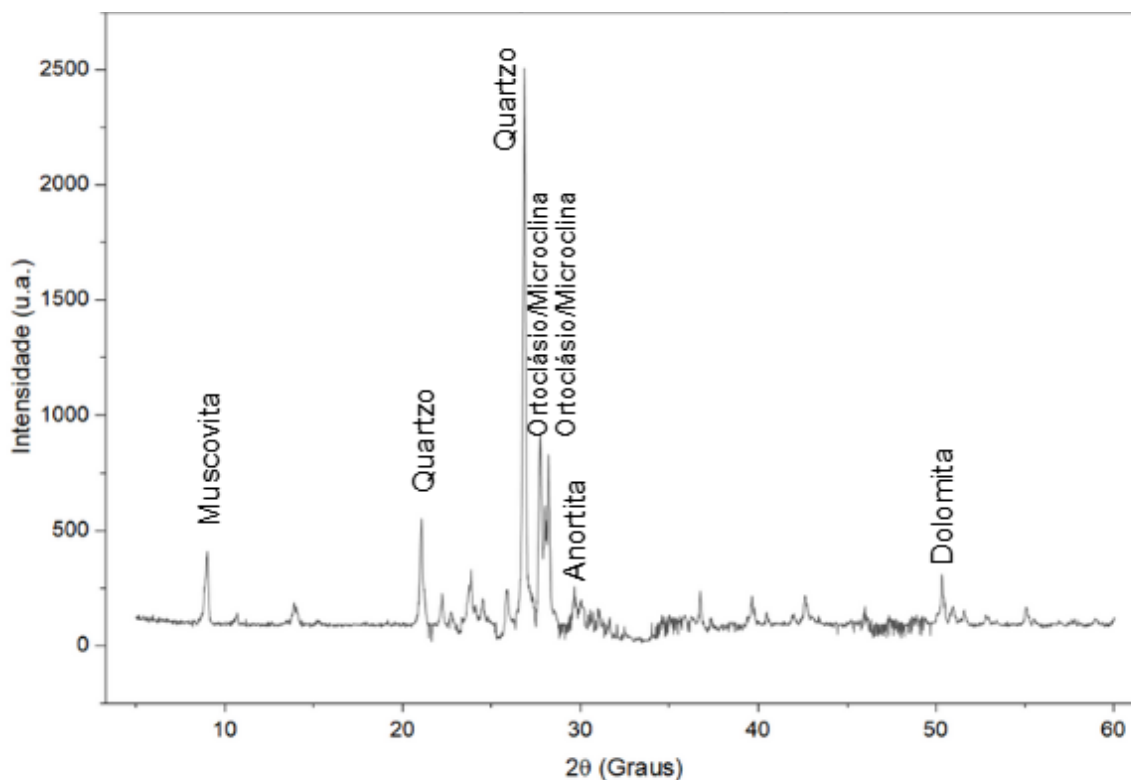
Foram ainda identificados picos correspondentes a feldspatos potássicos (ortoclásio e microclínio), na faixa de $2\theta \approx 27\text{--}30^\circ$, além da presença de micas (biotita e muscovita), minerais que conferem maior heterogeneidade ao material. Esses resultados estão em consonância com as observações de Santos (2021), que destacou a composição feldspática e micácea como típica de resíduos provenientes do beneficiamento de granitos.

Embora em menor intensidade, também se verificou a presença de carbonatos (calcita e dolomita), resultado esperado devido à parcela de mármore presente no resíduo. Achados semelhantes foram descritos por De Oliveira *et al.* (2024), que relacionaram os carbonatos à redução da durabilidade em alguns compósitos cimentícios, em função de maior suscetibilidade a reações químicas.

De maneira geral, o difratograma obtido confirma que o RCMG apresenta uma composição mineralógica complexa, típica de misturas de rochas silicáticas (granito)

e carbonáticas (mármore). Essa diversidade mineralógica impacta diretamente nas propriedades da argamassa, podendo influenciar tanto a absorção de água quanto a resistência mecânica do compósito.

Figura 21: Difração de Raios X



Fonte: Autoria própria (2025)

4.1.3 Agregado miúdo - Areia

A caracterização física da areia natural utilizada como agregado miúdo está apresentada na

Tabela 10. O material apresentou diâmetro máximo de 4,75 mm e módulo de finura de 2,4, o que o enquadra como um agregado de granulometria média, em conformidade com a NBR 7211 (2009). A curva granulométrica (Figura 22) indica distribuição contínua das partículas, condição favorável para a trabalhabilidade e empacotamento da argamassa.

A massa específica encontrada foi de $2,57 \text{ g/cm}^3$, valor típico para areias quartzosas e ligeiramente inferior ao resíduo de corte de mármore e granito ($2,74 \text{ g/cm}^3$ – seção 4.1.1). Já a massa unitária foi de $1,23 \text{ g/cm}^3$, consideravelmente inferior à do RCMG ($1,64 \text{ g/cm}^3$), evidenciando menor densificação e maior volume de vazios

quando o material se encontra solto.

Esse comportamento é coerente com as características da areia fluvial, cujo formato de grãos mais arredondados favorece a trabalhabilidade, mas não proporciona a mesma compactação volumétrica observada em materiais de origem britada. Conforme Silva *et al.* (2023), essas diferenças influenciam diretamente a consistência e a densidade das argamassas, destacando a importância da análise comparativa com o RCMG.

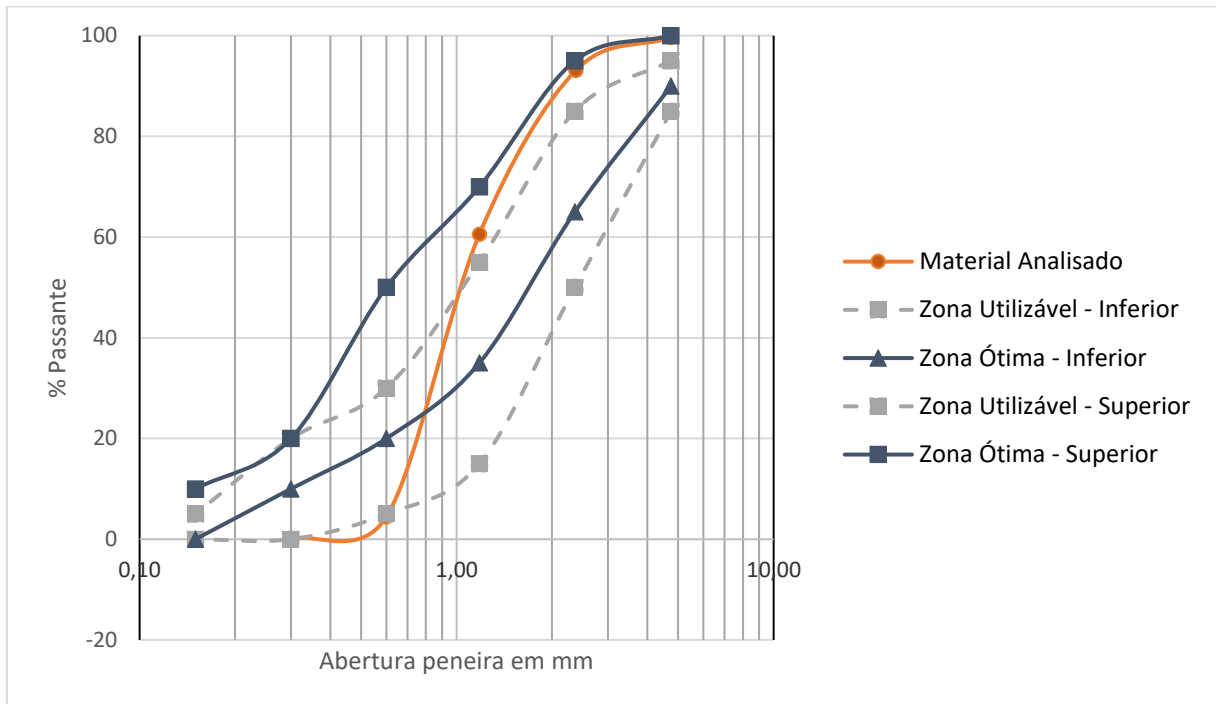
De forma geral, a areia utilizada atende aos requisitos normativos para uso em argamassas de revestimento e serviu como parâmetro de comparação para a avaliação do desempenho do RCMG. A análise conjunta dos resultados evidencia que, enquanto a areia natural confere estabilidade e trabalhabilidade à mistura, o resíduo apresenta maior densidade e absorção, características que devem ser balanceadas para viabilizar sua utilização como substituto parcial.

Tabela 10: Ensaio do agregado miúdo

Tyler	Abertura (mm)	% Passante
4	4,75	99,642
8	2,36	93,142
16	1,18	60,582
28	0,6	4,442
48	0,3	0,105
Diâmetro Máximo (mm)		4,75
% Módulo de Finura		2,421
Massa Específica (g/cm³)		2,57
Massa unitária (g/cm³)		1,234

Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 22: Curva granulométrica da areia



Fonte: Autoria própria (2025)

4.2 Propriedades no Estado Fresco

4.2.1 Espalhamento (Flow Table)

O ensaio de espalhamento tem como objetivo avaliar a consistência e trabalhabilidade das argamassas no estado fresco. Todas as misturas foram ajustadas para atingir a faixa normatizada de 260 ± 5 mm, conforme estabelece a NBR 13276 (2016). Os resultados, representados nas Figura 23, mostram que os traços de referência (REF) e com substituição de 10% (T-10) apresentaram comportamento semelhante, evidenciando que baixos teores de RCMG não comprometem a consistência. Nos teores de 20% e 30% (Figura 24), observou-se leve redução na fluidez inicial, associada à maior absorção de água do resíduo (18,06%), demandando ajustes na relação água/cimento. Essa tendência corrobora estudos de Apolinário (2014) e Almada *et al.* (2022), que apontam o efeito do RCMG na retenção hídrica da mistura. De forma geral, mesmo com ajustes na relação a/c, a trabalhabilidade foi mantida dentro da faixa normativa, comprovando que a substituição parcial de areia e

cimento por RCMG é tecnicamente viável para produção de argamassas de revestimento.

Figura 23: Ensaio de espalhamento (Flow Test)



Legenda: A) Espalhamento do REF-F; B) Espalhamento do T-10

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 24: Ensaio de espalhamento (Flow Test)



Legenda: A) Espalhamento do T-20; B) Espalhamento do T-30

Fonte: Autoria própria (2025)

4.3 Propriedades no Estado Endurecido

4.3.1 Resistência à compressão

A Tabela 11 apresenta os resultados médios de resistência à compressão aos 7 e 28 dias. O traço de referência (REF-1) apresentou valores de 5,80 MPa e 7,81 MPa, respectivamente, compatíveis com argamassas da classe P4/P5 segundo a NBR 13281 (2005). Nos traços com substituição de areia, os melhores resultados foram observados no T-20, atingindo 8,44 MPa (7 dias) e 7,44 MPa (28 dias),

sugerindo que a presença do resíduo contribuiu para o empacotamento granular e ganho inicial de resistência. Já no T-30, houve redução significativa (3,48 e 5,88 MPa), indicando que teores elevados podem comprometer a matriz devido ao excesso de absorção e alteração da zona de transição.

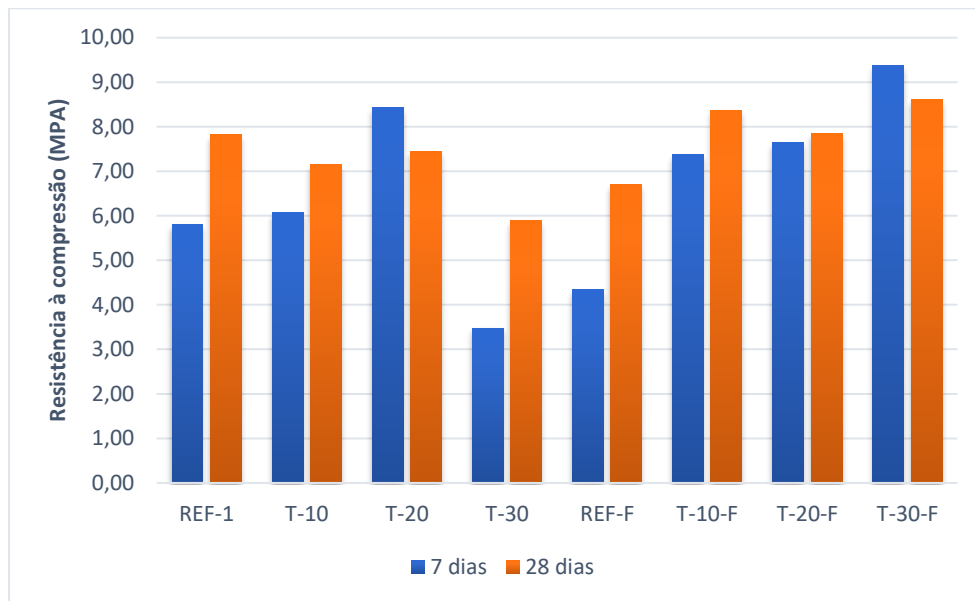
Nas misturas com adição de finos (T-10F, T-20F e T-30F), os resultados foram superiores em quase todas as idades, com destaque para o T-30F, que atingiu 9,37 MPa aos 7 dias e 8,61 MPa aos 28 dias, superando inclusive o traço de referência, conforme Tabela 12. Esse comportamento confirma o efeito filler do RCMG, promovendo nucleação e melhora na compactação da pasta cimentícia, conforme relatado por Almada *et al.* (2022) e Rezvani e Proske (2017). Assim, verifica-se que a incorporação de RCMG em até 20% e 30 % como agregado miúdo e até 10% como filler é benéfica, apresentando desempenho compatível ou superior ao da argamassa convencional.

Tabela 11: Resultado da resistência à compressão (MPa)

	7 dias	Sd	Coeficiente de Variação	28 dias	Sd	Coeficiente de Variação
REF-1	5,80	0,93	15,97%	7,81	2,82	36,09%
T-10	6,07	1,66	27,33%	7,16	1,81	25,29%
T-20	8,44	4,04	47,85%	7,44	2,88	38,66%
T-30	3,48	0,68	19,62%	5,88	1,07	18,14%
REF-F	4,34	2,20	50,80%	6,70	3,99	59,53%
T-10-F	7,38	1,60	21,69%	8,37	1,34	15,98%
T-20-F	7,64	2,14	17,16%	7,85	1,35	17,16%
T-30-F	9,37	1,23	19,79%	8,61	1,70	19,79%

Fonte: Autoria própria (2025)

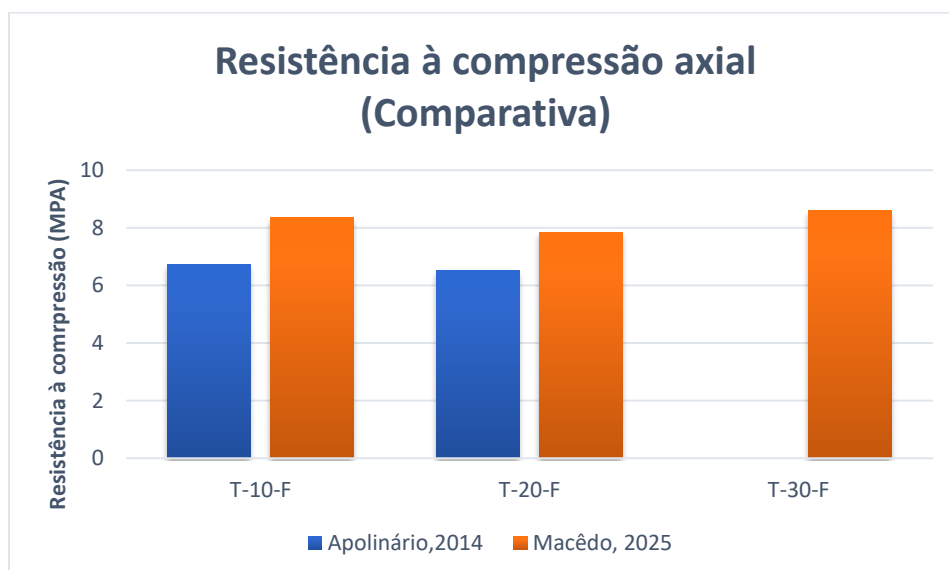
Tabela 12: Gráfico da resistência à compressão



Fonte: Autoria própria (2025)

Fazendo uma análise comparativa (Tabela 13) com os resultados obtidos por Apolinário (2014), temos que, a argamassa com resíduo a 10% e 15% tiveram como resultado 6,72 Mpa e 6,53 Mpa, respectivamente. Comparando com a obtida neste trabalho, a argamassa com RCMG a 10%, 20% e 30% foi, respectivamente, 8,37 Mpa, 7,85 MPa e 8,61 Mpa.

Tabela 13: Comparativo com Apolinário, 2014



Fonte: Autoria própria (2025)

4.3.2 Resistência à tração na flexão e à compressão

A Figura 25 mostra como ficaram os corpos de provas após o rompimento a flexão. Desse modo, os resultados do ensaio de tração na flexão (Tabela 14) evidenciam comportamento semelhante ao observado na compressão. O traço REF apresentou 2,96 MPa (7 dias) e 3,44 MPa (28 dias). O teor de 20% (T-20) mostrou-se novamente favorável, alcançando 3,81 MPa e 3,78 MPa, confirmando boa interação entre os grãos de RCMG e a matriz.

No traço T-30 houve queda (1,56 e 2,22 MPa), confirmando que substituições elevadas prejudicam a integridade da pasta. Já nos traços com adição de finos, os valores permaneceram estáveis ou superiores ao REF (Tabela 15), com destaque para o T-20F, que atingiu 4,20 MPa aos 28 dias, enquadrando-se em argamassas de classe R5/R6 (NBR 13281, 2005).

Figura 25: Corpos de provas rompidos a flexão



Fonte: Autoria própria (2025)

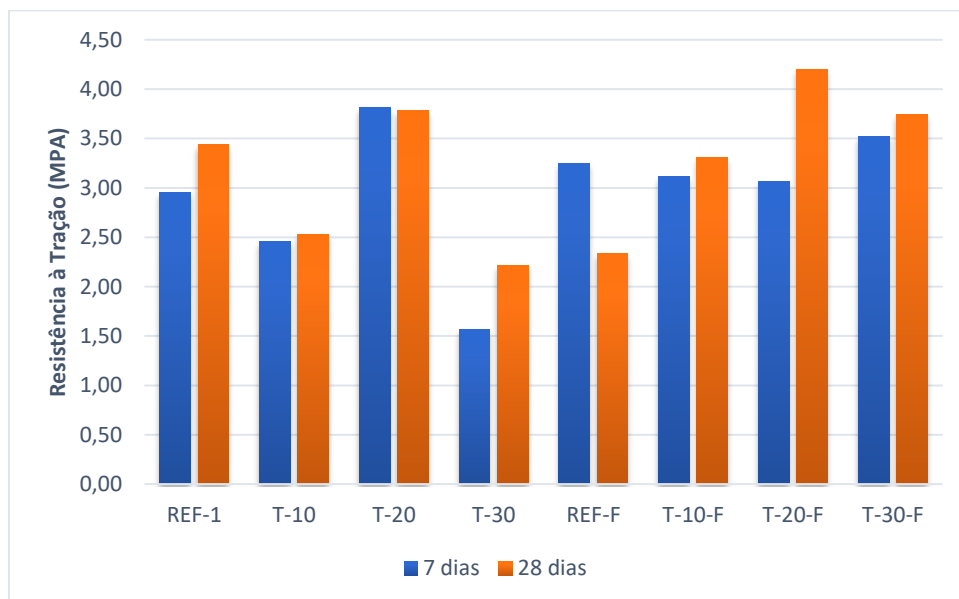
Dessa forma, os resultados apontam que a adição de RCMG como filler melhora a resistência à tração na flexão, reduzindo a porosidade e favorecendo o ganho de rigidez.

Tabela 14: Média e desvio padrão da tração sob flexão

	7 dias	Sd	Coeficiente de Variação	28 dias	Sd	Coeficiente de Variação
REF-1	2,96	0,43	14,52%	3,44	0,53	15,56%
T-10	2,45	0,43	17,41%	2,53	0,46	18,15%
T-20	3,81	1,27	33,25%	3,78	0,97	25,60%
T-30	1,56	0,43	27,35%	2,22	0,21	9,37%
REF-F	3,25	1,07	32,84%	2,34	1,50	64,25%
T-10-F	3,12	0,27	8,70%	3,31	0,37	11,15%
T-20-F	3,07	0,44	14,46%	4,20	0,23	5,58%
T-30-F	3,52	0,30	8,45%	3,74	0,28	7,57%

Fonte: Autoria própria (2025)

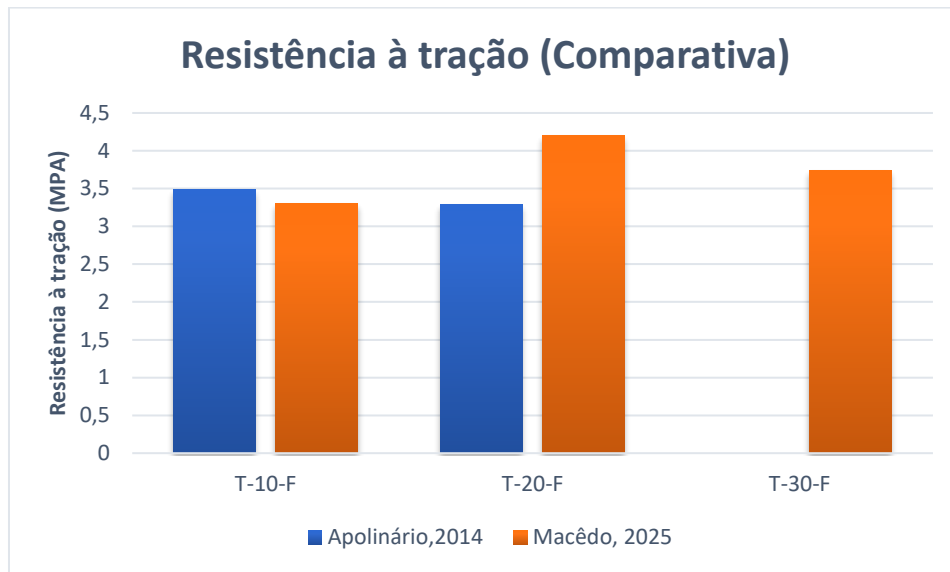
Tabela 15: Resistência à tração sob flexão



Fonte: Autoria própria (2025)

Fazendo uma análise comparativa com os resultados obtidos por Apolinário (2014), temos que, a argamassa com resíduo à 10% e 15% tiveram como resultado 3,49 Mpa e 3,29 Mpa, respectivamente. Comparando com a obtida neste trabalho, a argamassa com RCMG a 10%, 20% e 30% foi, respectivamente, 3,31 Mpa, 4,20 MPa e 3,74 Mpa.

Tabela 16: Comparativo com Apolinário, 2014

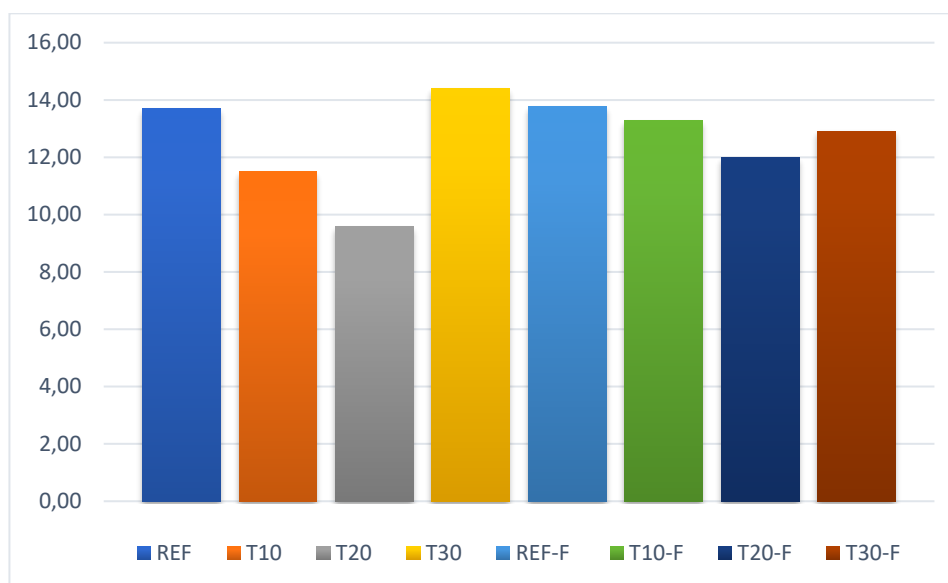


Fonte: Autoria própria (2025)

4.3.3 Absorção de água

O ensaio de absorção (Tabela 17) evidencia a influência direta da substituição do agregado natural pelo resíduo. Os traços com maiores teores de RCMG apresentaram valores mais elevados de absorção, comportamento esperado em função da maior porosidade e absorção intrínseca do resíduo (18,06%). No entanto, a adição de finos atenuou esse efeito, reduzindo a absorção em comparação aos traços apenas com substituição de areia. Isso indica que a presença do filler contribui para refinar a microestrutura, preenchendo vazios e dificultando a penetração de água, como fica evidenciado a maior absorção foi a substituição de 30% de areia (T-30) resultando em uma absorção de 14,40%. Esse resultado corrobora estudos de Nyako *et al.* (2023), que destacam o papel do RCMG na diminuição da conectividade dos poros. Portanto, embora a absorção aumente com teores elevados de substituição, a incorporação equilibrada de finos demonstra ser uma estratégia eficaz para mitigar esse efeito.

Tabela 17: Média da Absorção em porcentagem



Fonte: Autoria própria (2025)

4.3.4 Densidade

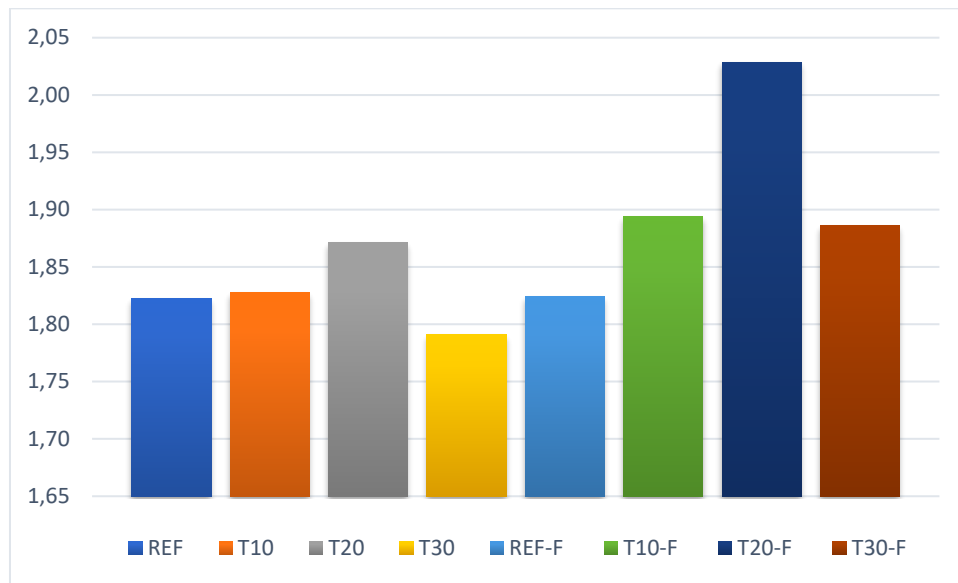
A densidade aparente das argamassas endurecidas foi determinada conforme a NBR 13280 (2005). Os resultados, apresentados na Tabela 18, evidenciam que os valores variaram entre 1,79 g/cm³ e 2,03 g/cm³, estando dentro da faixa típica para argamassas de revestimento.

Observa-se que o traço de referência (REF) apresentou valor médio de 1,82 g/cm³, compatível com argamassas convencionais à base de cimento Portland. Nos traços com substituição de areia pelo resíduo (T-10, T-20 e T-30), houve discreta redução da densidade, proporcional ao aumento do teor de RCMG.

Por outro lado, nos traços com adição de finos (T-10F, T-20F e T-30F), os valores de densidade tenderam a se aproximar ou até superar os do traço de referência. Isso se deve ao efeito filler, em que as partículas mais finas do RCMG promovem melhor empacotamento dos grãos e redução dos vazios internos, resultando em matriz mais compacta.

De modo geral, pode-se elencar que a substituição parcial de areia por RCMG reduz levemente a densidade da argamassa, mas a adição de finos é capaz de compensar esse efeito, garantindo valores adequados para aplicações em revestimentos. Esses achados estão em consonância com estudos de Apolinário (2014) e Almada *et al.* (2022), que também observaram redução moderada de densidade com resíduos de rochas ornamentais, sem prejuízo ao desempenho global.

Tabela 18: Densidade em g/cm³



Fonte: Autoria própria (2025)

4.3.5 Ensaio de arrancamento

Os resultados obtidos para a resistência de aderência à tração estão na Tabela 19 e ilustrados na Figura 26. Observa-se que a argamassa de referência (REF-F) apresentou valores compatíveis com a NBR 13279, sendo classificada como A3, confirmando a confiabilidade da metodologia empregada.

Figura 26: Resultado da superfície após ensaio



Fonte: Autoria própria (2025)

Por outro lado, a argamassa T-30F, que incorpora 30% de substituição de agregado por resíduo de corte de mármore e granito (RCMG), apresentou desempenho expressivamente superior, atingindo um ganho de 27,61% em relação a

argamassa de referência. Esse resultado evidencia o potencial técnico da utilização do resíduo como insumo alternativo, não apenas mantendo as propriedades mecânicas da argamassa, mas também proporcionando melhorias significativas em sua resistência.

Esses achados corroboram trabalhos anteriores que destacam a viabilidade da incorporação de resíduos de rochas ornamentais em argamassas. Segundo Cavalcanti *et al.* (2022), a presença de partículas mais finas provenientes dos resíduos pode contribuir para um melhor empacotamento dos grãos e, conseqüentemente, para a redução da porosidade, resultando em maiores valores de resistência à compressão. De forma semelhante, Crepani *et al.* (2001) ressaltam que a reutilização de resíduos minerais na construção civil pode gerar benefícios técnicos e ambientais, reforçando a sustentabilidade do processo construtivo.

Tabela 19: Resultado ensaio de arrancamento

	Média (Kgf)	Sd	Média (Mpa)	Sd	Coeficiente de Variação
REF-F	161,50	42,72	0,81	0,21	26,45%
T-30F	206,08	32,57	1,03	0,16	15,80%

Fonte: Autoria própria (2025)

Além disso, é necessário avaliar as formas de ruptura dos corpos de provas retirados do painel. De acordo com a NBR 13528:2019, foi observado que os corpos de provas foram majoritariamente do tipo B e C. Segundo Ruduit (2009), o tipo B (Figura 27) e tipo C (Figura 28) corresponde à ruptura que ocorre na interface entre o substrato e o chapisco. Entretanto, essa ocorrência não esteve associada à má cura ou à deficiência do chapisco, mas sim à elevada resistência do substrato de concreto utilizado. É importante destacar que, em condições usuais de obra, superfícies de concreto recebem primeiramente o chapisco de aderência (argamassa colante do tipo AC-III), seguido pelo chapisco convencional, e somente depois a aplicação da argamassa de revestimento. No presente estudo, o rompimento ocorreu no elo mais fraco do sistema, justificado pela interação entre argamassa e o substrato de concreto.

Figura 27: Corpo de prova classificado como tipo B



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 28: Corpo de prova classificado como tipo C



Fonte: Autoria própria (2025)

4.4 Resultado econômico

Com base na análise financeira realizada, foi adotado o traço T30-F, considerado o mais representativo do estudo em função do desempenho técnico obtido. A partir dele, procedeu-se à redução de 10% do consumo de cimento e 30% do consumo de areia, substituídos pelo resíduo de corte de mármore e granito.

A composição de referência, Tabela 8 indicava um custo unitário de R\$ 531,13 por metro cúbico de argamassa. Após os ajustes proporcionais (Tabela 20)

nas quantidades de insumos, o custo recalculado da argamassa modificada foi de R\$ 489,41. Dessa forma, observou-se uma economia de 7,85% em relação ao preço referencial (Tabela 21).

Tabela 20: Composição Sinapi ajustada para melhor traço

código	Nome	Custo unitário	Quantidade	Qtd Ajustada	unidade	custo total
88831	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL DE 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV, SEM CARREGADOR - CHI DIURNO. AF_05/2023	0,38	3,45	3,45	CHI	1,31
88830	BETONEIRA CAPACIDADE NOMINAL DE 400 L, CAPACIDADE DE MISTURA 280 L, MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO POTÊNCIA DE 2 CV, SEM CARREGADOR - CHP DIURNO. AF_05/2023	1,69	1,05	1,05	CHP	1,77
88377	OPERADOR DE BETONEIRA ESTACIONÁRIA/MISTURADOR COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	32,47	4,50	4,50	H	146,11
1379	CIMENTO PORTLAND COMPOSTO CP II-32	0,62	195,86	176,27	KG	109,29
1106	CAL HIDRATADA CH-I PARA ARGAMASSAS	0,93	174,10	174,10	KG	161,91
370	AREIA MEDIA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)	85,00	1,16	0,81	M3	69,02

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 21: Redução de Custo

Descrição	Custo Total (R\$)	Redução (%)
Sinapi 87292 - Ref	531,13	7,85%
Sinapi 87292 - T30F	489,41	

Fonte: Autoria própria (2025)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou avaliar a viabilidade técnica e econômica da utilização do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) como substituto parcial da areia e do cimento na produção de argamassas de revestimento. A pesquisa teve como motivação a elevada geração de rejeitos pela indústria de rochas ornamentais e a necessidade de alternativas sustentáveis que reduzam o consumo de recursos naturais não renováveis.

A caracterização física e química do RCMG demonstrou que o material apresenta granulometria compatível com os limites normativos para agregado miúdo, além de alta densidade e significativa absorção de água. Esses aspectos influenciaram diretamente a dosagem das misturas exigindo ajustes na relação água/cimento para manutenção da trabalhabilidade.

No estado fresco, verificou-se que a incorporação do resíduo em teores de até 30% não comprometeu a consistência das argamassas, mantendo-se os valores dentro da faixa estabelecidas pela NBR 13276:2016. No estado endurecido os

resultados da resistência à compressão e a tração na flexão indicaram que o traço T-30F apresentou o melhor desempenho global, superando argamassa de referência em termos de resistência mecânica e aderência ao substrato. Esse comportamento pode ser atribuído ao efeito de empacotamento de partículas mais finas do resíduo, reduzindo a porosidade e contribuindo para maior intensificação da matriz cimentícia, em consonância com os achados de Cavalcanti *et al.* (2022) e Crepani *et al.* (2001).

A análise econômica confirmou a viabilidade da substituição, uma vez que a adoção do traço T-30F com redução de 10% do consumo de cimento e 30% de areia resultou em uma economia de 7,85% no custo final por metro cúbico de argamassa. Esse resultado evidencia que, além dos benefícios técnicos ambientais, a solução proposta apresenta vantagens financeiras para aplicação em escala de obra.

Dessa forma, conclui-se que a utilização do RCMG como insumo alternativo em argamassa de revestimento é uma estratégia sustentável, capaz de mitigar impactos ambientais, reduzir custos e manter ou até aprimorar o desempenho técnico do material. Recomenda-se, para trabalhos futuros a ampliação dos ensaios em condições e durabilidade de longo prazo, avaliação do comportamento microestrutural em ambientes agressivos e inclusão da análise detalhada dos custos relacionados ao transporte, beneficiamento e peneiramento do resíduo, a fim de consolidar o uso do resíduo em diferentes contextos construtivos.

6. REFERÊNCIAS

- ALENCAR, Carlos Rubens Araujo. **Rochas ornamentais: manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo**. 1. ed. Cachoeiro do Itapemirim: IEL-ES, 2013. Disponível em: <http://www.sindirochas.com/arquivos/manual-rochas.pdf>. Acesso em: 14 Mar. 2025.
- AL-JRAJREH, Sondos S.; AL-HAMAIEDEH, Husam; AL-KHEETAN, Mazen J.; JWEIHAN, Yazeed S.; ALJAAFREH, Tariq. **Melhoramento de resíduos de rochas ornamentais como substitutos de areia em concreto usando agente de acoplamento de silano**. Resultados em Engenharia, v. 20, p. 101580, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101580>. Acesso em: 03 mar. 2025.
- ALMADA, Bruna Silva; SANTOS, White José dos; SOUZA, Silvia Roberta. **Resíduo de mármore e granito como adição mineral em argamassas com diferentes relações água-cimento**. Ambiente Construído, [S. l.], v. 22, n. 4, 2022. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/119776>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- AHMED, W.; HEIKAL, M.; FAROUK, S.; EL DESOKY, H.; EL-MAHALLAWY, M. **Incorporation of granitic wastes and Malha Formation clays in the sewage pipes industry: insights on industrial using and environmental impact**. Iraqi National Journal of Earth Science, v. 23, n. 1, p. 35-49, 2023. DOI: <https://doi.org/10.33899/earth.2023.135247.1026>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto – Especificação. NBR 7211**. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281-1:2023 — **Argamassa para assentamento e revestimento — Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281-2:2023 — **Argamassa para assentamento e revestimento — Parte 2: Determinação**

das propriedades no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2023.

ABNT. NBR 13528-1:2019 — **Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas — Determinação da resistência de aderência à tração — Parte 1: Requisitos gerais.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019

ABNT. NBR 13528-2:2019 — **Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas — Determinação da resistência de aderência à tração — Parte 2: Aderência ao substrato.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** 2. ed. Rio de Janeiro, 2015. Versão Corrigida 28.06.2016. 13 p.

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, 2009.

APOLINÁRIO, E. C. A. **Influência da adição do resíduo proveniente do corte de mármore e granito (RCMG) nas propriedades de argamassas de cimento portland.** 2014. 158 f. Dissertação – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

BENACHOUR, Y. *et al.* **Effect of filler type and content on the properties of self-compacting concrete.** Construction and Building Materials, v. 22, p. 2283–2289, 2008.

BENTZ, D. P. *et al.* **Limestone Fillers Conserve Cement.** Concrete International, v. 31, n. 11, p. 41–46, 2009.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CAVALCANTI, L. C. S.; ANDRADE, T. A.; SILVA, A. L.; SANTOS, F. H. M. **Avaliação do aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais em argamassas de revestimento: propriedades no estado fresco e endurecido.** Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, v. 15,

n. 3, p. 829-842, 2022.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; AZEVEDO, L. G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ FILHO, P. **Uso de resíduos de serragem de rochas ornamentais na construção civil**. Revista Brasileira de Geociências, v. 31, n. 3, p. 379-386, 2001.

DE OLIVEIRA, Andrielli Moraes *et al.* **INDICADORES DE RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS COM MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES**. REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 20, n. 1, p. 14-29, 2024.

LOPES, K. L. *et al.* **Efeitos da substituição parcial de cimento Portland por resíduo de marmoraria calcinado em argamassas** (Effects of partial replacement of Portland cement by calcined marble residue in mortars), 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Cavidade ressonante para medidas de permissividade dielétrica e permeabilidade magnética em banda larga**. São José dos Campos, [2024]. Disponível em: <https://pnipe.mcti.gov.br/equipment/20018>. Acesso em: 24 de Ago. 2025.

HABERT, G. *et al.* **Environmental comparison of three cement manufacturing technologies: LC3, Portland cement and Portland-limestone cement**. Cement and Concrete Research, v. 52, p. 1–9, 2013.

LANGE, D. A.; MÖRTEL, H.; RUDERT, V. **The water demand of concrete mixtures: influence of aggregate and cement properties**. Cement and Concrete Research, v. 27, n. 8, p. 1187–1192, 1997.

MACIEL, Kuelson Rândello Dantas; NOVAES, Mariana da Penha; TEODORO, Elilma Pereira Alves; CALMON, João Luiz. **UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MÁRMORE E GRANITO NO CONCRETO: LACUNAS NO CONHECIMENTO**. In: **ENCONTRO NACIONAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO**, 6., 2019. Anais [...]. [S. l.], 2019. p. 266–281. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/enarc/article/view/3403>. Acesso em: 17 ago. 2025. MANSO, E. **Análise Granulométrica dos solos de Brasília pelo Granulômetro a Laser**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. 113 f. UnB. Brasília, 1999.

- MORAES, I. V. M. **Mármore e granito: lavra, beneficiamento e tratamento de resíduos**. Disponível em: <<http://www.sbrt.ibict.br/dossie-tecnico/downloadsDT/MjE=>>. Acesso em 15 de mar. 2025.
- MOREIRA, Pamella Emúncio; DIAS, Josinaldo de Oliveira; XAVIER, Gustavo de Castro; VIEIRA, Carlos Maurício; ALEXANDRE, Jonas; MONTEIRO, Sérgio Neves; RIBEIRO, Rogério Pinto; AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez de. **Resíduos do processamento de rochas ornamentais incorporados na produção de argamassas: influência tecnológica e análise do desempenho ambiental**. Sustainability, v. 14, n. 10, p. 5904, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14105904>. Acesso em: 03 mar. 2025
- MOURA, Paulo Germano Toscano. **Materiais de construção civil** [livro eletrônico]. Porto Alegre, RS: Leia Livros, 2021. 208 p. ISBN 978-65-88416-13-6. Disponível em: World Wide Web. Acesso em: 20 de mar. 2025.
- MOURA, W. .; P GONÇALVES, J. .; SILVA LEITE, R. **UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CORTE DE MÁRMORE E GRANITO EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO E CONFECÇÃO DE LAJOTAS PARA PISO**. Sitientibus, [S. l.], n. 26, 2022. DOI: 10.13102/sitientibus.vi26.8755. Disponível em: <https://periodicos.uefs.br/index.php/sitientibus/article/view/8755>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- NYAKO, B. M.; ABDULAZEEZ, M. A.; USMAN, M. A.; MOSES, J. J. **Recycling of marble waste as sustainable supplementary cementitious materials for construction purposes**. Case Studies in Construction Materials, v. 18, e01559, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01559>.
- POWERS, T. C. **Structure and physical properties of hardened Portland cement paste**. Journal of the American Ceramic Society, v. 41, n. 1, p. 1–6, 1958.
- RAMEZANIANPOUR, A. A. *et al.* **Influence of limestone addition on hydration and microstructure of cement pastes**. Construction and Building Materials, v. 23, n. 1, p. 284–290, 2009.
- REZVANI, M.; PROSKE, T. **Effect of limestone filler replacement on strength and sulfate resistance of blended cement pastes**. Construction and Building Materials, v. 154, p. 784–794, 2017.

- RUDUIT, Felipe R. – **Contribuição ao estudo da aderência de revestimentos de argamassa e chapiscos em substrato de concreto**. Porto Alegre, 2009, 175p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2009.
- SANTOS, A. G. dos. **Análise da utilização de resíduos de rochas ornamentais**. Rio de Janeiro: CETEM, 2021. Série Rochas e Minerais Industriais.
- SILVA, Leandro S.; AMARIO, Mayara; STOLZ, Carina M.; FIGUEIREDO, Karoline V.; HADDAD, Assed N. **Uma revisão abrangente do pó de pedra no concreto: comportamento mecânico, durabilidade e desempenho ambiental**. Buildings, v. 13, n. 7, p. 1856, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings13071856>. Acesso em: 03 mar. 2025.
- ZHANG, Z.; LI, W.; JIANG, Z.; LUO, L.; HU, X. **Recycling of marble waste: a review based on the sustainable development goals**. Materials, v. 15, n. 24, p. 9066, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15249066>.